Grundsätzliches zur Sicherheit der Tragwerke

Working Paper

Author(s):
Knoll, Franz

Publication date:
1965

Permanent link:
https://doi.org/10.3929/ethz-a-000747195

Originally published in:
Bericht / Institut für Baustatik ETH Zürich 5

Prom. Nr. 3701

GRUNDSÄTZLICHES ZUR SICHERHEIT DER TRAGWERKE

Von der
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN
HOCHSCHULE IN ZÜRICH

zur Erlangung
der Würde eines Doktors der
technischen Wissenschaften
genehmigte

PROMOTIONSARBEIT

Vorgelegt von

FRANZ KNOLL
dipl. Bauingenieur ETH
von Frauenfeld TG

Referent: Herr Prof. Dr. B. Thürlimann
Korreferent: Herr Prof. Dr. h.c. F. Kobold

1965, Solothurn, Vogt-Schild AG

Erscheint im «Schweizer Archiv für angewandte Wissenschaft und Technik», 31. Jahrgang 1966

MEINEN LIEBEN ELTERN GEWIDMET

Leer - Vide - Empty

Vorwort

Bei der Erforschung des Sicherheitsproblems mit statistischen Methoden hat sich gezeigt, dass diese aus verschiedenen Gründen nicht hinreichen, um auf schlüssige Lösungen zu führen. Wohl können statistische Resultate formuliert werden, die aber oft mit den Beobachtungen der Baupraxis nicht übereinstimmen.

Aufgabe der vorliegenden Untersuchung ist einerseits, die Resultate der statistischen Methoden beim Sicherheitsproblem bis zu ihrer Anwendung in der Bemessungspraxis zu verfolgen. Anderseits werden jene Fragen behandelt, die über den Anwendungsbereich exakt-wissenschaftlicher Theorie hinausgehen. Das Ziel ist, anhand der Voraussetzungen der Statistik die Grenzen der Gültigkeit statistischer Gesetze festzustellen und mit Hilfe einiger Beispiele aus dem Gebiete des Stahlbetons zu diskutieren.

Herrn *Prof. Dr. B. Thürlimann* gebührt mein herzlicher Dank für die grosszügige Förderung meiner Arbeit. Herrn *Prof. Dr. h.c. F. Kobold* bin ich für seine wertvollen Ratschläge und Hinweise verpflichtet, die mir eine grosse Hilfe waren. Dank gebührt auch meinen Arbeitskollegen vom Institut für Baustatik und vom Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, die mir in vielen fruchtbaren Diskussionen mit ihrer Kritik beistanden.

Finanziell wurde mir die Untersuchung ermöglicht durch den eidgenössischen Volkswirtschaftskredit. Ich bin den Mitgliedern des Stiftungsrates dafür zu Dank verpflichtet.

ETH, Zürich im Frühjahr 1965

Franz Knoll

Leer - Vide - Empty

Inhaltsverzeichnis

Bezeichnungen

(in Klammern ist jeweils beigefügt, wo die Erklärung oder Definition des betreffenden Ausdrucks zu finden ist).

A	Zwischengrösse
A_g	geschätzter Wert der Grösse A
A_t	tatsächlicher, wahrer Wert von A
B	Zwischengrösse
E	günstiges Ereignis (*3.1.*)
E'	ungünstiges Ereignis, Schaden (*3.2.*, *3.3.*)
$F(x)$	Wahrscheinlichkeitsfunktion von x (*4.2.*)
Fe	Armierungsquerschnitt
M	Biegemoment
M_p	plastisches Moment (*4.2.*)
N	Normalkraft
P	Belastung (*3.4.*)
P_N	Nutzlast
P_{Pr}	Probebelastung, Prüflast
S	Sicherheitsfaktor (*2.1.*, *3.6.*)
$\bar{S}$	erforderlicher Sicherheitsfaktor, Median der Verteilung des Sicherheitsfaktors (*4.2.*, *4.3.*)
S'	Zusatzfaktor (*5.4.5.*)
S^*	Hilfsgrösse
T	Tragfähigkeit (*3.3.*)
$W(E)$	Wahrscheinlichkeit für das Eintreffen von E
X_i, Y_i	Parameter der Sicherheit (*5.2.ff.*)
Z	Sicherheitszone (*3.6.*)
b	Breite des Querschnittes
d, d'	Abmessungen des Querschnittes
e	Exzentrizität
f_i	lineare Funktionen
$f(x)$	Verteilung (Wahrscheinlichkeitsdichte) von x (*4.2.*)
g	Faktor der Verteilungsfunktionen (*4.3.*)
g	Eigengewicht
h	statische Höhe
i, j	Indizes
k	Reduktionsfaktor
l	Länge
l_i	Beobachtungen, Messwerte
m	ganze Zahl

m_i	Materialfaktoren
n	ganze Zahl
p	verteilte Belastung
q_i	Belastungsanteile
v_x	Variationskoeffizient von x (*4.1.*)
w	verteilte Windbelastung
z	Zielfunktion
Φ	Hilfsgrösse
α_i	Parameter der Bauwerkseigenschaften
β_D	Druckfestigkeit des Betons
ε	Abweichung
$\varkappa$	Hilfsgrösse
λ_i	Lastfaktoren (*4.5.2.*)
μ	Armierungsgehalt
μ_{Gr}	Grenzarmierungsgehalt
$\mu_{\log x}$	Median der logarithmisch normalen Verteilung von x
ξ	Verhältniszahl
σ_F	Fliesspannung des Stahles
σ_b	Betonspannung
σ_e	Stahlspannung
σ_x	Standardabweichung von x (*4.1.*)
$\sigma_{\log x}$	logarithmische Standardabweichung von x
φ, ψ	Winkel

Einige Symbole aus Mathematik und algebraischer Logik

$A \wedge B$	Alle Ereignisse, die sowohl zur Sorte A als auch zur Sorte B gehören
$A \vee B$	Alle Ereignisse, die entweder zu A oder zu B oder zu beiden Sorten gehören
$X > Y$	Die Ereignisse, deren Eigenschaft durch die verzeichnete Ungleichung gegeben ist
sign (K)	Vorzeichenfunktion von K, «Vorzeichen» von K
$\overset{n}{\underset{1}{\Pi}}(x_i)$	Produkt aus allen x_i für $1 \leq i \leq n$

GRUNDSÄTZLICHES ZUR SICHERHEIT DER TRAGWERKE

FRANZ KNOLL, dipl. Ing., Institut für Baustatik, ETH

1. Einleitung

In der heutigen Bautechnik nimmt die Sicherheit der Tragwerke unter den Elementen der Projektierung einen wichtigen Platz ein. Durch die Forderungen nach wirtschaftlicher Bauweise, nach Betriebssicherheit und Dauerhaftigkeit sind wir gezwungen, die Sicherheitsbetrachtung bei jedem Projekt als Prüfstein für die veranschlagte Güte der geplanten Bauten anzuwenden. Die immer schärfer werdende Forderung nach Wirtschaftlichkeit führt auf eine immer knappere Bemessung der Tragelemente, was eine immer bessere und klarere Formulierung des Sicherheitsbegriffs und der davon abgeleiteten Massnahmen nötig macht. Eine gute Formulierung kann aber nur gewonnen werden, wenn man den betrachteten Begriff bis auf seine Grundlagen zurückverfolgt. Von da aus müssen mit den Hilfsmitteln der Wissenschaft – Logik, Mathematik und empirischen Methoden – die Beziehungen des Begriffs zu den betroffenen Gegenständen entwickelt werden. In unserem Fall sind dies die Tragwerke mit allem, was auf sie und ihr Verhalten einwirkt. Wie die neuere Forschung gezeigt hat, kann man das Sicherheitsproblem als Aufgabe der Statistik und der Wahrscheinlichkeitsrechnung formulieren. Anderseits muss aber immer gefragt werden, ob die Lösung, die man mit den Mitteln dieser beiden Disziplinen gewinnt, auch etwas Brauchbares aussagt, d.h. ob ihr Resultat für weitere, zum Beispiel quantitative Schlüsse verwendbar ist.

In vielen Fällen erweist es sich, dass dies wohl bis zu einem gewissen Grade möglich ist, der für den betreffenden Fall befriedigt. Das trifft vor allem in der Massenfabrikation (siehe *8.1.*) und bei rein natürlichen Vorgängen und Effekten zu. Diese lassen sich nämlich oftmals unter den gleichen oder fast gleichen Bedingungen beobachten, woraus man gemäss den Gesetzen der Statistik zuverlässige Resultate gewinnen kann. Behandelt man solche Resultate dann mit statistischen Methoden, so erhält man eine Aussage über ihre Genauigkeit, die wiederum zur Bestimmung von verhältnismässigen Gewichten verwendet werden kann. Das Gewicht einer Beobachtung ist ein Masstab für ihren Wahrheitsgehalt und spielt somit in allen Ausgleichungsprozessen eine sehr wichtige Rolle.

In dieser Arbeit soll die Anwendung derselben Methoden auf die Eigenschaften der Bauwerke diskutiert sowie die Anwendung der daraus gewonnenen Resultate auf das Sicherheitsproblem gewertet werden. Für die üblichen Fälle von Bauwerken und der Bedingungen, unter denen sie erstellt werden, lässt sich nämlich nicht ohne weiteres schliessen, dass die Gesetze und Regeln der Statistik ihre Gültigkeit behalten: Weder ist das Bauwerk das Produkt eines natürlichen Vorganges, noch kann mit einer öfteren, fabrikmässigen Wiederholung der gleichen Bedingungen gerechnet werden. Vielmehr muss man bei fast allen Tragwerken den mehr oder weniger starken Einfluss des menschlichen Handelns berücksichtigen, welches ein Ergebnis des beschränkten Könnens, ja sogar der reinen Willkür einzelner Personen sein kann. Solche Effekte können wir nicht als zufällig betrachten, womit die wichtigste Voraussetzung für die Gültigkeit der Gesetze der Statistik entfällt. Ausserdem sind die meisten Tragwerke – abgesehen von einigen Ausnahmen – Einzelfälle. Somit müssen wir auch auf das «Gesetz der grossen Zahl», eine weitere wichtige Voraussetzung für die Wirksamkeit statistischer Aussagen, verzichten. Diese Argumente müssen allerdings vorerst als Vermutungen verstanden werden, die sich aber schon bei ziemlich oberflächlicher Betrachtung aufdrängen. Sie sollen später nachgeprüft und näher erörtert werden.

Formuliert man die Sicherheit als Resultat einer Wahrscheinlichkeitsbetrachtung, so erscheint sie in einer Form, die für die Bemessungspraxis nicht verwendbar ist. Wir sind deshalb gezwungen, den Sicherheitsbegriff in Vergleichswerte umzuformen, die sich besser in den Gang einer statischen Berechnung einfügen. Dabei gilt es, verschiedene Aspekte zu berücksichtigen, die sich nicht ohne weiteres zur Übereinstimmung bringen lassen. Auch hier wird somit eine Aufgabe gestellt sein, die sich nur durch einen Optimalisierungsprozess befriedigend lösen lässt. Neben rein zahlenmässigen Argumenten enthält die Aufgabe allerdings auch formale und praktisch-methodische Gesichtspunkte, so dass sie nicht mit arithmetischen oder algebraischen Methoden gelöst werden kann. In grossen Zügen soll sie bis zu einem Lösungsvorschlag durchbehandelt werden, der die Sicherheitsbeiwerte (Vergleichswerte) für Tragwerke in Stahlbeton zum Gegenstand hat. Die meisten Argumente, die in der Untersuchung beigezogen werden, haben – soweit sie sich nicht auf spezifische Stahlbetonprobleme beziehen – auch für andere Bauweisen Gültigkeit.

Zum besseren Verständnis wird im Anschluss daran auch noch die Anwendung des Lösungsvorschlages an zwei typischen Bemessungsbeispielen des Stahlbetons gezeigt. Dadurch soll vor allem die methodische Eignung der Sicherheitsbeiwerte in der praktischen Bemessung geprüft werden.

2. Voraussetzungen, Problemstellung

2.1. Historische Gegebenheiten

[27]

Die Bauwerke haben sich im Laufe der Zeit aus einigen wenigen Grundformen bis zur heutigen Vielfalt entwickelt. Neben dem Schutze des Menschen vor schädlichen Einflüssen von aussen – Witterung, Temperatur, Feinde – werden ihnen immer mehr andere Zwecke zugewiesen: Aufbewahren von Gütern, Raum für Versammlungen und Anlässe, Verkehrserleichterung, Raum für industrielle Produktion und Ausstellungen, ästhetische und demonstrative Wirkung u.a.m.

Parallel dazu geht eine andere Entwicklung: Die Bauten werden zu Konsumgütern und somit zu einem wichtigen Faktor der Wirtschaft. Dies äussert sich, wie schon oben bemerkt, in der Forderung nach ökonomischer Bauweise, die aber eine neue Art von Gefahr mit sich bringt. Wo am Anfang die Bauten ausschliesslich Mittel zum persönlichen Schutze des Menschen waren, selbst aber wegen ihrer Einfachheit keine Gefahr in sich bargen, da werden sie heute immer mehr zu einer bedeutsamen Gefahrenquelle. Diese Entwicklung lässt sich bis zu den Anfängen der Geschichtsschreibung zurückverfolgen. Sie ist durch einige spektakuläre Einstürze gezeichnet, wie zum Beispiel beim Turmbau zu Babel.

Diesem neuen Risiko sieht sich die Technik gegenüber, seit sie an den Grenzen ihrer Leistungsfähigkeit operiert. Das Problem der Sicherheit liegt nun darin, die Gefahren, die aus den Bauwerken selbst kommen, einzuschätzen und Massnahmen zu finden, durch die sich das Risiko auf ein befriedigendes Mass beschränken lässt.

Verfolgt man die Erkenntnis über die Sicherheitsmassnahmen beim Bauen zurück in der Geschichte, so stellt man fest, dass schon lange – seit das Bauen anfing «gefährlich zu werden» – gewisse allgemeine Regeln angewandt wurden. Sie konnten allerdings bis ins neunzehnte Jahrhundert hinein nicht wissenschaftlich formuliert werden, denn man verfügte über die theoretischen Grundlagen noch nicht und baute nach Gefühl und persönlicher Einsicht. Somit waren sie Bestandteil der althergebrachten Baukunst, ohne dass man sie davon hätte abstrahieren können. Es wurden zwar immer wieder Versuche unternommen, das Problem in zahlenmässigen Vergleichen auszudrücken. Diese führten aber nicht zum Ziel, solange nicht die Grundlagen der Statik zur Verfügung standen und ins Bewusstsein der Ingenieure aufgenommen waren. Englische Ingenieure des achtzehnten Jahrhunderts waren die ersten, die die Sicherheit einzelner Tragwerksteile unter Belastung prüften, um von da aus auf die Sicherheit zusammengesetzter Bauten zu schliessen. Es handelte sich dabei um den Druckwiderstand von Mauerwerk und gusseisernen Stäben, entsprechend der damaligen Praxis, die vor allem die direkte Übertragung vertikaler Kräfte auf die Unterlage als wesentlich betrachtete. Man formulierte zum ersten Male eine Vergleichszahl der Sicherheit: den Sicherheitsfaktor. Er ist definiert als Verhältniszahl zwischen der ermittelten höchsten Prüflast (Tragfähigkeit) und der im Gebrauchszustand aufzubringenden Belastung:

$$S = \frac{P_{Pr}}{P_N} = \frac{T}{P} \tag{1}$$

Nach der Einführung der Stabstatik und der elastischen Festigkeitslehre als Grundlage der Bemessung wurde der Sicherheitsfaktor weiterentwickelt. Man bildete zulässige Spannungen, und die Bauwerke wurden so dimensioniert, dass ihre Beanspruchung unter Gebrauchslast nirgends die Grenzen der zulässigen Spannungen überschritt.

Seit der ersten Hälfte des zwanzigsten Jahrhunderts traten andere Betrachtungsweisen auf. Einmal wurde es nötig, die elastische Theorie erster Ordnung durch die Theorie zweiter Ordnung und die Lehre von den Stabilitätsproblemen zu ergänzen. Dann wurde die Forderung nach einer Theorie laut, die es erlaubt, Tragwerke nicht mehr nur beim elastischen Verhalten, sondern darüber hinaus bis zum Zusammenbruch zu untersuchen, und die es zudem ermöglicht, das Bruchkriterium anstelle des bis dahin üblichen Deformationskriteriums der Elastizitätstheorie als Bemessungsgrundlage einzuführen. Man erforschte die plastische Theorie als Ergänzung zur elastischen Festigkeitslehre.

Daneben gewann die Erkenntnis Raum, dass die Daten und somit auch die Resultate der statischen Berechnungen alle mit Fehlern – zum Teil sehr bedeutenden – behaftet sind. Dies ist eine für das Sicherheitsurteil entscheidende Tatsache, und man versucht seither, den Begriff der Sicherheit mit statistischen Informationen über Fehler und Abweichungen bei den Daten der Tragwerke in Zusammenhang zu bringen.

Dies ist eine für die Bautechnik neue Art der Formulierung. Sie entspricht zwar dem eigentlichen Inhalt des Sicherheitsbegriffs viel eher als die früher entwickelten Vergleichswerte wie Sicherheitsfaktoren, zulässige Spannungen usw. Sie erfordert aber im Gegensatz zu jenen eine genauere und lückenlose Erforschung aller Daten und Vorgänge, die mit der Sicherheit der Tragwerke im Zusammenhang stehen. Sie kann sich nicht auf blossen oder teilweisen «gesunden Menschenverstand» stützen, wie dies bis heute bei allen Sicherheitsüberlegungen der Fall war. Das Sicherheitsurteil auf Grund statistischer Informationen ist deshalb erst in speziellen Ausnahmefällen möglich. Dies wird sich erst ändern, wenn wir unvergleichlich viel mehr über die Eigenschaften und das tatsächliche Verhalten der Bauwerke wissen.

Daneben gibt es, wie schon oben erwähnt wurde, weitere gewichtige Einwände gegen den Erfolg rein statistisch geführter Sicherheitsüberlegungen. Die Hauptaufgabe dieser Arbeit soll im wesentlichen sein, aufzuzeigen, in welchem Masse sich die Erkenntnis über die statistischen Eigenschaften der Bauwerke heute schon für die Bautechnik und die Ermittlung der Sicherheit verwenden lässt.

2.2. Problemstellung, Gliederung

Bevor die Sicherheit in irgendeiner Ausdrucksform behandelt wird, muss sie zuerst sauber beschrieben werden können. Dazu gehört vor allem die begriffliche und, soweit wie möglich, auch die mathematische Formulierung mit ihr verwandter und in Beziehung stehender Begriffe. Da es sich bei diesen nur zum Teil oder nur bedingt um physikalische, sinnlich erfahrbare Gegenstände handelt, muss der Begriffsbildung ziemlich viel Platz eingeräumt werden. Dies ist die Aufgabe des dritten Abschnittes der Untersuchung.

Sind die Begriffe einmal zusammengestellt, und ist ihr Zusammenhang gedanklich festgelegt, so kann man zur mathematischen Darstellung und zur Herleitung von Beziehungen schreiten. Diese müssen diskutiert und zusammen mit den Methoden der Statik und Statistik analysiert werden. Spezifischer ausgedrückt wird es sich um das Studium der Abweichungen – der zufälligen und der nichtzufälligen – handeln, um welche die in der Bemessungspraxis verwendeten Daten von den repräsentierten tatsächlichen Grössen verschieden sind. Dies ist der Inhalt von Abschnitt 4: Darstellung und Berechnung der Sicherheit.

Die Sicherheit ist, wie aus den historischen und einleitenden Bemerkungen hervorging, eine der wichtigsten Eigenschaften der Tragwerke. Wirtschaftliche und menschliche Werte werden ihr zugeordnet. Da die Bauwerke für die Zukunft projektiert werden, muss auch die Sicherheit Bestandteil solcher Projekte sein. Sie enthält die Beurteilung aller möglichen Fehler und Abweichungen, die während der Projektierung das Bauwerkes auftreten könnten, sie muss alle Mängel, die bei der Bauausführung zu erwarten sind, berücksichtigen und die Folgen aller dieser «Sünden» abschätzen. Das heisst natürlich nicht, dass durch das Sicherheitsurteil alle diese Abweichungen zugelassen werden sollen, da man sich doch über ihre Häufigkeit und ihre Folgen Rechenschaft gibt. Vielmehr muss der Sicherheitsnachweis auch die Massnahmen enthalten, die man zur Vermeidung der Fehler oder ihrer Folgen getroffen hat oder vorsieht; denn diese sind es erst, die das Gegengewicht zu den Abweichungen und Unsicherheiten bilden, die man nicht vermeiden kann.

Die Sicherheit wird demnach zu einem begrifflich recht komplizierten Gebilde, und es wird notwendig, einige Spezifikationen dazu zu erläutern (*3.2.*).

Der endliche Zweck einer Betrachtung des Sicherheitsproblems ist es ja, den Begriff in einer Form, mit einem Aussagegehalt darzustellen, die ihn zu einem gebrauchsfähigen Instrument für die Bemessung der Bauwerke machten. Die Vielfalt der Bauten und der Bedingungen, unter denen sie stehen, bringt es mit sich, dass keine allgemein gültigen Formeln und Regeln für den zahlenmässigen Ansatz der Sicherheit ermittelt werden können. Aus formalen, methodischen und praktischen Gesichtspunkten ergeben sich in vielen Fällen spezielle Anforderungen an einen Vergleichswert, die sich nicht alle gleichzeitig befriedigen lassen. Als Resultat wird ein System von Sicherheitsmargen zu suchen sein, das die verschiedenen Ansprüche möglichst gleich gut befriedigt. Das Vorgehen, das dazu führt, wird anhand einiger Beispiele aus dem Stahlbetonbau diskutiert werden. Es ist nicht möglich, auf beschränktem Raum auf spezielle Fälle einzugehen und diese erschöpfend zu behandeln. Dafür wird in zwei einfachen Beispielen die Anwendung der Sicherheitsbeiwerte bis zu ihrem zahlenmässigen Einsatz bei der Bemessung von Tragwerken durchgeführt (*6.*).

2.3. Voraussetzungen, Einschränkungen

- Bei allen Bauwerkstypen, die in der Untersuchung vorkommen, handelt es sich um ruhende Körper. Ihr Tragverhalten wird nicht durch eine Bewegung beeinflusst, und es sollen auch keine Bewegungskräfte auftreten.
- Für die Belastungen müssen ähnliche Einschränkungen gemacht werden. Pulsierende oder stossähnlich aufgebrachte Lasten sowie solche, die Langzeiteinflüsse (Kriechen, Schwinden, Ermüdung) wirken lassen, werden nicht berücksichtigt. Es sei dazu auf die Arbeiten von Freudenthal verwiesen [21, 22, 223].
- Es werden nur Spannungsprobleme erster Ordnung betrachtet. In einfachen Fällen, besonders bei statisch bestimmten Systemen, können die Resultate der Untersuchung, die Sicherheitsbeiwerte, auch auf Stabilitätsfälle angewandt werden. Sind solche aber in Verbindung mit statisch unbestimmten Systemen zu untersuchen, so wird die Rechnung wegen der nichtlinearen Beziehung zwischen Belastung und Beanspruchung entsprechend komplizierter. Sie wird dann in ähnlicher Weise zu führen sein, wie dies für den Fall einer plastischen Bemessung nach der Mechanismusmethode in Beispiel *6.2.* gezeigt wird.
- Der Satz vom Ebenbleiben der Querschnitte wird, wo er die Berechnung vereinfacht, stillschweigend vorausgesetzt. Elastische und plastische Festigkeitslehre werden als so gute Näherungen angenommen, dass aus ihrer Verwendung keine Fehler entstehen, die nicht neben andern Abweichungen vernachlässigt werden können.
- Spezielle Bauten wie Dämme, Staumauern, Kriegsbauwerke können in der Betrachtung nicht eingeschlossen werden, da für sie ganz andere Überlegungen gelten.
- Treten an einem Tragwerk mehrere Kräfte als Belastung gleichzeitig auf, so wird angenommen, dass sich die Lage des Angriffspunktes der Kräfte sowie ihre Richtung und ihr gegenseitiges Verhältnis während einer Laststeigerung nicht ändert. Diese Voraussetzung wird in Beispiel *6.2.* fallengelassen. Im Anhang (*8.2.*) wird noch auf spezielle Probleme eingegangen, die sich aus dieser Voraussetzung und mit ihr verwandten Annahmen ergeben.
- Für die aus der Statistik und Wahrscheinlichkeit herkommenden Beziehungen und Gesetze wird vorausgesetzt, dass sie stets auf gegenseitig unabhängige Variable angewandt werden. Dies ist nicht überall nachweisbar der Fall. Somit sind die statischen Resultate aus diesem Grunde Näherungen. Da wir allerdings über mögliche Korrelationen bei den statistischen Daten der Bauwerke überhaupt keine Informationen besitzen, würden wir durch das Berücksichtigen der Abhängigkeit gewisser Daten voneinander

nur neue Unbekannte – die Korrelationskoeffizienten – in die Untersuchung einführen, ohne dass wir über die Mittel zu deren Bestimmung verfügen.

- Die in den Beispielen und zum Teil auch in der Diskussion verwendeten Daten und Zahlenwerte sind, so weit dies möglich war, der Literatur über entsprechende Untersuchungen entnommen. Da aber lange nicht über alle Grössen Auskünfte zur Verfügung stehen, mussten die Lücken durch Schätzungen («educated guesses») ausgefüllt werden, wofür die in der Schweiz zurzeit üblichen Verhältnisse und Baumaterialien die Grundlage bildeten [41–45].

3. Begriffsbildung

3.1. Der Begriff der Sicherheit

Die Sicherheit ist ein Begriff aus der Wahrscheinlichkeitsrechnung. Er existierte sinngemäss schon, bevor diese mathematische Disziplin es erlaubte, ihn rechnerisch zu deuten. Sicherheit bedeutet eine hohe Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein wohldefiniertes Ereignis (E) eintrifft. Die Sicherheit ist somit immer kleiner oder gleich wie die Einheit. Beträgt sie gerade eins (100%), so spricht man von Gewissheit. Diese kommt aber auf dem Gebiete der Tragsicherheit von Bauwerken nicht vor; man muss stets mit der Möglichkeit eines Alternativereignisses (E') rechnen, dessen Wahrscheinlichkeit nicht ganz verschwindet.

Unter Sicherheit verstehen wir im folgenden stets die Wahrscheinlichkeit für das Ereignis E, das vorläufig kurz als «günstiges Ereignis» bezeichnet sein soll. Es steht im Gegensatz zum Ereignis E', das etwa durch das Wort «Schaden» allgemein gekennzeichnet werden kann. Über die spezifische Bedeutung der beiden Ereignisse wird noch zu sprechen sein (*3.2.*).

Zwischen den beiden Ereignissen gelten die folgenden logischen Beziehungen:

$$E \wedge E' = 0 \qquad (2)$$
$$E \vee E' = 1$$

In Worten bedeutet das: E und E' sind alternativ, d.h. sie schliessen einander aus, und es gibt keine andern möglichen Ereignisse ausser E und E'. Ein Beweis, dass diese Annahme im Fall der Sicherheit der Tragwerke richtig ist, wäre ein Problem der Logik. Vermutlich würde es nur auf eine weitere Annahme führen, die wiederum nicht anders als mit empirischen Ermittlungen erhärtet werden könnte. Da es aber plausibel ist, dass einem Bauwerk «etwas» geschieht oder eben «nichts» geschieht, soll auf eine weitere Diskussion dieser rein formalen Frage verzichtet werden.

Analog zur Formulierung der formalen Logik kann man in Termen der Wahrscheinlichkeitsrechnung schreiben:

$$W(E) + W(E') = 1 \qquad (3)$$

Darin bedeutet $W(E)$ die Wahrscheinlichkeit von E, also die Sicherheit, $W(E')$ entsprechend die Wahrscheinlichkeit des Schadens E'.

Damit der Begriff der Sicherheit etwas Vorstellbares bedeutet, bedarf es einer Beschreibung eines der beiden Ereignisse. Diese wird zwar in den meisten Diskussionen weggelassen, weil sie als selbstverständlich vorausgesetzt wird. Häufig ist aber die Klarheit über das gemeinte Ereignis nur scheinbar, und so soll im folgenden, wo es nötig ist, jeweils die Spezifikation beigegeben werden.

Die Sicherheit ist meist nur wenig kleiner als die Gewissheit. Deshalb ist es einfacher, die zur Sicherheit komplementäre Wahrscheinlichkeit $W(E')$ des Schadens zu betrachten, die eine kleine Grösse ist und deshalb ohne Genauigkeitsverlust behandelt werden kann. Hinzu tritt, dass man für die Wahrscheinlichkeit des Schadens in der Häufigkeit von Schadenfällen ein übersichtliches Äquivalent besitzt. Ausserdem kann der Begriff Schaden positiv und somit meist einfacher beschrieben werden, als es für das durch die Sicherheit selbst qualifizierte Ereignis E möglich wäre, dessen Spezifikation stets ein Verzeichnis aller jener möglichen Schäden umfassen müsste, die nicht eintreten sollen.

Es muss hier besonders betont werden, dass die Sicherheit nur durch einen wahrscheinlichkeitstheoretischen Ausdruck sinnvoll wiedergegeben werden kann. Es kann zu gefährlichen Fehlschlüssen führen, wenn statt dessen irgendwelche Vergleichswerte wie der Sicherheitsfaktor als «Sicherheit» bezeichnet werden. Die Sicherheit hat nur Werte zwischen null und eins:

$$0 < W(E) < 1 \qquad (4)$$

3.2. Spezifikationen der Sicherheit, Begriff des Schadens

Bisher ist allgemein von einem Schaden gesprochen worden, nämlich von einem ungünstigen Ereignis, das einem Bauwerk mit der Wahrscheinlichkeit $W(E')$ zustossen könnte, und das es deshalb zu vermeiden gilt. Da es niemals ganz ausgeschlossen werden kann, muss man sich mit einer Reduktion seiner Wahrscheinlichkeit auf ein zufriedenstellendes Mass begnügen.

Der Inhalt des Begriffes Schaden bedarf einer Erläuterung, weil er sehr verschiedene Bedeutungen haben kann.

Aus der Geschichte der Bauwerke und aus der täglichen Beobachtung derselben ist bekannt, dass Schäden an allen Orten, in mannigfaltiger Form und in ganz verschiedenem Ausmass entstehen können. Wesentlich ist meist, welches die Auswirkung des Schadens auf das Fortbestehen des Bauwerkes und auf seine Gebrauchsfähigkeit (serviceability) ist. Ein Schaden ist dann gegeben, wenn das Bauwerk in irgendeiner seiner Funktionen beeinträchtigt ist. Ausserdem schliesst die eine Art des Schadens die andern nicht aus. Im folgenden sollen nur jene Ereignisse E' heissen, die das Tragverhalten des Bauwerks verändern. Alles andere, wie Schönheitsfehler, Verminderung der Isolation oder Undurchlässigkeit, wird in der Untersuchung ausser acht gelassen. Über die Bedeutung der Verformungen wird in diesem Sinne noch zu sprechen sein. Da sich darüber keine generellen Feststellungen machen lassen, muss dies der Behandlung spezifischer Beispiele vorbehalten bleiben.

Als einzige Ursache von Schäden wird die Krafteinwirkung betrachtet. Korrosion, chemische Zersetzung und Abnützung usw. sind im allgemeinen Langzeiteinflüsse und somit nach den gemachten Voraussetzungen nicht Gegenstand der Untersuchung. Am selben Bauwerk können mehrere Arten von Schäden auftreten. Sie sollen durch den Index i unterschieden werden, der alle jene Zahlen annehmen kann, die Schäden bezeichnen, gegen die man das Tragwerk sichern möchte. E' ist dann die Gesamtheit aller E'_i, in der Schreibweise der algebraischen Logik:

$$E'_i \subset E' \quad i = 1,2, \dots \tag{5}$$

Neben den verschiedenen Arten von Schäden soll auch die örtliche Beschreibung desselben im Index i enthalten sein.

Wird nun die Sicherheit bezüglich eines einzigen Schadens E'_i angeschrieben:

$$W(E_i) = 1 - W(E'_i) \tag{5a}$$

so ist dies nur dann eine bedeutsame Aussage, wenn i auch den einzigen Schaden beschreibt, der in diesem Fall von Belang ist. Dies wird häufig nicht zutreffen, und man möchte die Sicherheit dafür kennen, dass keiner aus den mehreren Schäden E'_i auftritt, dass also dem Tragwerk «nichts» passiert. Dies ist dann zugleich die sinnvolle Bedeutung der Sicherheit überhaupt, und diese soll, wo nichts anderes bemerkt ist, in diesem Sinne verstanden werden. Sie lässt sich angeben nach der Formel:

$$W(E) = \prod_i [1 - W(E'_i)] \tag{6}$$

die allerdings nur dann gilt, wenn sich die E'_i gegenseitig ausschliessen, d.h. statistisch ausgedrückt, dass ihre Wahrscheinlichkeiten nicht korreliert sind. Diese Voraussetzung ist im allgemeinen nicht erfüllt. Der Fehler, den man begeht, wenn man sie trotzdem statuiert, führt aber auf eine Unterschätzung der Sicherheit, wie man leicht nachprüfen kann. Eine bessere Begründung findet man aber, wenn man die zeitliche Aufeinanderfolge der Schäden in Betracht zieht. Ist nämlich der erste Schaden aufgetreten, so ist nach Voraussetzung das Bauwerk in seinem Tragverhalten beeinträchtigt und somit verändert. Es muss mit seinen neuen Eigenschaften einer weiteren Untersuchung unterzogen werden. Wir betrachten somit Tragwerke nur so lange, bis der erste für das Tragverhalten wesentliche Schaden aufgetreten ist. Somit können wir allgemein schreiben:

$$W(E) = 1 - W(E') \tag{6a}$$

und wir meinen mit E' den ersten auftretenden Schaden.

Für die Diskussion des Sicherheitsproblems ist noch eine Beziehung des Begriffes Schaden zur Betrachtungsweise der Statik notwendig. Sie muss es ermöglichen, das Schadenereignis E' in technischen Ausdrücken zu beschreiben. Hiezu sind noch einige Begriffe notwendig, die im folgenden kurz erörtert werden sollen.

3.3. Die Tragfähigkeit

Als Mass für den Widerstand eines Tragwerks definieren wir jene Grösse der angreifenden Kräfte, unter deren Beanspruchung das Tragwerk den ersten Schaden erleidet. Wir bezeichnen sie allgemein als Tragfähigkeit mit dem Symbol T, gleichgültig, in welcher Form sie angeschrieben wird.

In der Elastizitätstheorie setzt man als Kriterium für die erreichte Tragfähigkeit eine Verformung so, dass, wenn an irgendeiner Stelle diese Verformung erreicht ist, die Untersuchung des Tragwerks abgebrochen wird. Ein solches Kriterium entspricht meist nicht einem bedeutungsvollen Schaden und verändert auch das Tragwerk nicht notwendigerweise so stark, dass sein Tragverhalten ändert. Hingegen stellt es in der Regel die Grenze der Gültigkeit der elastischen Theorie dar, die, darüber hinaus angewandt, auf falsche Resultate führt. In diesem Sinne muss deshalb die Elastizitätsgrenze bei allen elastischen Berechnungen statt eines wirklichen Schadens substituiert werden.

In der Plastizitätstheorie wird als Kriterium der Tragfähigkeit meist ein sogenanntes Bruchereignis bezeichnet, dessen Eintreffen in der Regel das Ende des Tragwerks bedeutet, d.h. dass ein Tragwerk, das diesen Schaden erlitten hat, praktisch nicht mehr weiter verwendbar ist. Das Bruchereignis ist dann gegeben, wenn die Verformungen an irgendeiner Stelle des Tragwerks ohne endlich grosse Laststeigerung beliebig weiter wachsen. Da ein solcher Fall auch auftreten kann, ohne dass die Grenze der Elastizitätstheorie überschritten wurde (Stabilitätsprobleme usw.), ist die Definition in dieser Weise nicht genügend genau. Eine bessere Beschreibung des Bruchereignisses findet sich in einer Energiebetrachtung: Bruch tritt dann ein, wenn die gesamte durch äussere Kräfte geleistete Arbeit im Tragwerk dissipiert, d.h. in nichtmechanische Energie umgesetzt wird (Prinzip der virtuellen Verschiebungen).

Die Tragfähigkeit kann in verschiedenen Formen ausgedrückt werden: in Termen der äusseren Kräfte (Traglast); in Form von Schnittkräften (z.B. als plastisches Moment); als Spannung oder sogar als Verformung, wie das in der Elastizitätstheorie üblich ist. Werden statisch unbestimmte Systeme auf ihre Tragfähigkeit gegen Bruch untersucht, so muss korrekterweise die Form der Traglast verwendet werden, weil Schnittkräfte und Spannungen nicht mehr eindeutig nachgewiesen werden können. Setzt man statt dessen die Form einer Schnittkraft, so heisst dies stets, dass die Berechnung eine Näherung der plastischen Theorie ist.

Die Beschreibung des spezifischen Bruchvorganges (Mechanismus) ist von höchster Wichtigkeit für die Grösse der Tragfähigkeit. Die Konsequenz daraus wird an einem einfachen Fall aus Beispiel *6.2.* ersichtlich. Sobald man nämlich die Daten der Tragwerke als statistische Grössen auffasst, kann nicht mehr mit Gewissheit nachgewiesen werden, auf welche Weise die Grenze des Widerstandes erreicht wird, d.h. es können verschiedene Arten von Schäden «die ersten» sein.

3.4. Die Belastung

Unter der Belastung eines Tragwerks ist ganz allgemein eine Gruppe von Kräften zu verstehen, die von aussen auf dieses einwirken. Dadurch werden meist Beanspruchungen und Verformungen hervorgerufen, die in manchen Fällen in einfachem Zusammenhang mit der Grösse der Belastung stehen. Dann ist es sinnvoll, die Belastung in der gleichen Form wie die Tragfähigkeit darzustellen. Bei der elastischen Berechnung wird dies meist die Form der Spannungen sein, bei statisch bestimmten Systemen die Form der Schnittkräfte für die Berechnung der Bruchbelastung, oder, für alle Fälle brauchbar, die Form der Traglast. Im letzten Fall muss aber die Konfiguration der Belastung (Angriffspunkte und relative Grösse der einzelnen angreifenden Kräfte) fest gegeben sein, so dass für die gedachte Vergrösserung vom Wert null bis zur Traglast nur noch ein Wert, die absolute Grösse der Belastung, verändert werden muss. Bleiben die einzelnen Anteile der Belastung nicht proportional oder verschieben sich ihre Angriffspunkte und -richtungen, so muss statt der in dieser Untersuchung behandelten Systeme von Sicherheitsbeiwerten eine etwas allgemeinere Methode angewandt werden, die sich aber aus dem hier Gezeigten auf einfache Weise ableiten lässt. Ein Beispiel für deren Darstellung findet man in [226].

Die Belastung kann zur Zeit des Projekts, das ja auch den Sicherheitsnachweis enthalten muss, nicht beobachtet werden. Trotzdem müssen Werte dafür eingesetzt werden. Man behilft sich dann mit Schätzungen, die aus Analogieschlüssen mit der Belastung bereits bestehender Bauten herrühren, oder die man für typische Fälle in Normen kodifiziert hat.

Diese Werte sind reine Rechengrössen. Ihre Beziehung zu den tatsächlichen Belastungen ist aber für das Sicherheitsproblem entscheidend wichtig. Darüber wird noch zu sprechen sein (*5.2.13.*). Vorläufig soll, wo von Belastung oder Nutzlast gesprochen wird, ein solcher Rechenwert gemeint sein, der durch das Symbol P allgemein bezeichnet wird.

3.5. Das Tragwerk, Struktur und Eigenschaften

Tragwerke oder Bauwerke sind feste Körper, die an ihnen angreifende Kräfte auf eine Unterlage übertragen. Zu diesen Kräften (Belastung) gehört stets auch das Eigengewicht des Tragwerks. Sowohl das Tragwerk wie auch seine Unterlage können beweglich sein, nach *2.3.* sollen aber aus solchen Bewegungen keine zusätzlichen Kräfte entstehen. Ebenfalls soll die relative Geschwindigkeit zweier Punkte eines zusammenhängenden Stücks immer verschwinden oder vernachlässigbar klein sein (keine Stösse, Schwingungen usw.).

Ein Tragwerk kann für die statische Berechnung in einzelne Teile zerlegt werden, wobei jedes Element für sich als besonderes Tragwerk weiterbehandelt wird. Dies ist allerdings nicht immer vorteilhaft, wie wir sehen werden; der Inhalt des Begriffes Tragwerk soll aber diese Möglichkeit enthalten.

Die Tragwerke besitzen eine wichtige strukturelle Eigenschaft, die kurz als «Schaltung» bezeichnet werden kann. Sie lässt sich vergleichen mit der elektrischen Schaltung: In beiden Fällen gibt es Widerstände; für beide Fälle bestehen zwei mögliche Arten der elementaren Schaltung: Die Serie- und die Parallelschaltung. In der Statik bestimmt sich daraus die Übertragung der Kräfte, das «Kräftespiel» im Tragwerk; im elektrischen Netz entscheidet die Schaltung über die Verteilung der Ströme.

Zwei kleine Beispiele mögen den Sinn des Begriffs Schaltung bei den Tragwerken zeigen: Der Serieschaltung entspricht eine Kette, der Parallelschaltung ein Seil (Drahtbündel). Allerdings darf man nicht ohne weiteres aus der bildlichen Analogie zum elektrischen Netz auch auf quantitative physikalische Analogie schliessen. Deshalb wird auf eine weitere Ausführung der Ähnlichkeit verzichtet, und die Konsequenzen der statischen Schaltung müssen für sich allein betrachtet werden.

Der Unterschied zwischen beiden Schaltungsarten ist für das Sicherheitsproblem sehr wichtig. Er lässt sich an den erwähnten Beispielen sehr einfach fassen:

Eine Kette trägt so viel wie ihr schwächstes Glied *(Abb. 1)*. Ein Seil gibt nach, wenn auch der letzte Faden fliesst *(Abb. 2)*. Bei der zweiten Regel muss allerdings noch eine Voraussetzung erfüllt sein, nämlich dass beim Seilmaterial ein genügender Fliessbereich vorhanden ist.

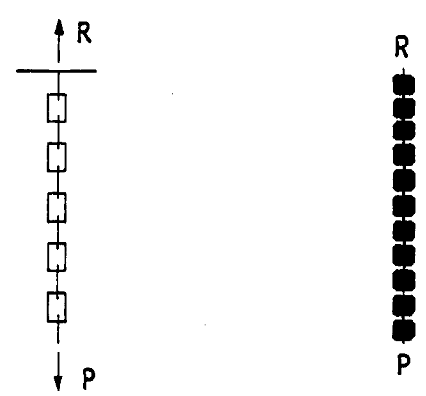


Abb. 1

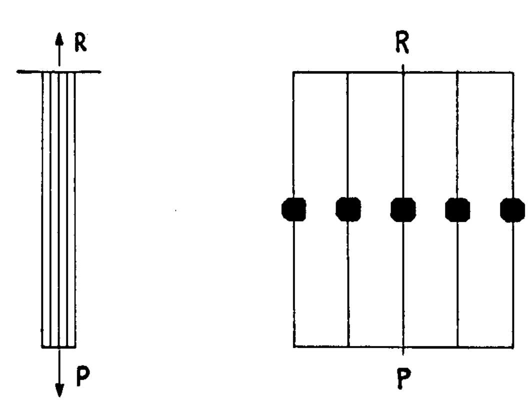
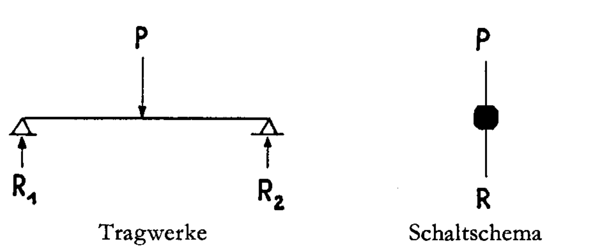


Abb. 2



Tragwerke Schaltschema

Abb. 3

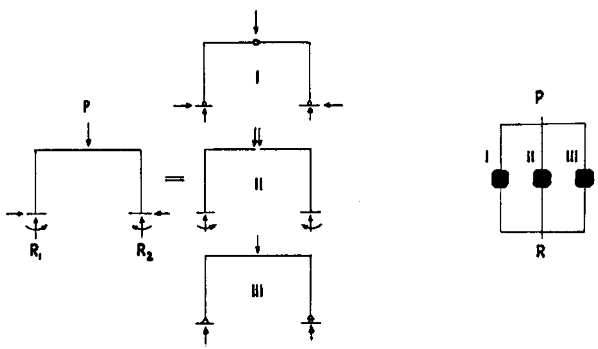
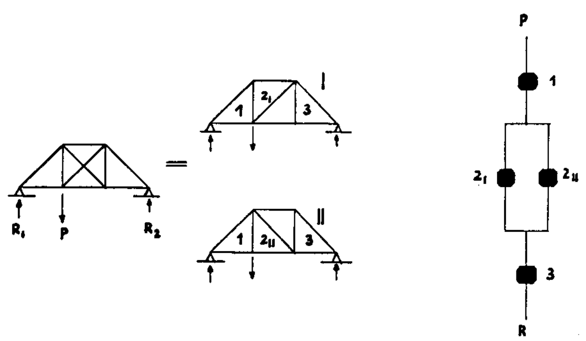


Abb. 4



Tragwerk Auflösung Schaltschema

Abb. 5

Alle Tragwerke können als Schaltschemata dargestellt werden, wobei es sich, bei infinitesimaler Betrachtung, stets um eine Kombination der beiden Möglichkeiten handelt: Man kann sich jedes Tragelement der Länge (Haupttragrichtung) nach in Elemente aufgeteilt denken, die zueinander in Serie geschaltet sind. Anderseits lässt sich jeder Querschnitt in einzelne Fasern auflösen, woraus sich eine Parallelschaltung ergibt. Diese Möglichkeit soll aber hier nicht weiter interessieren, sondern wir betrachten die Tragwerke im grossen, d.h. als Schaltung ihrer Elemente (Stäbe, Platten, Scheiben usw.). Dann finden wir, dass es sowohl reine Serie- und Parallelschaltung gibt neben Kombinationen von beiden. Einige einfache Beispiele sind in den *Abbildungen 1 bis 5* zusammengestellt. Für den Fall der Parallelschaltung kann man zum besseren Verständnis das Tragwerk in einzelne Stränge aufgelöst denken (Kraftwege), wobei teilweise die gleichen Stäbe, aber in verschiedener Funktion an der Kraftübertragung beteiligt sind.

Mit den Worten der Statik ausgedrückt bedeutet Serieschaltung: Statisch bestimmtes System, d.h. es gibt nur einen bestimmten Weg, auf dem Kräfte übertragen werden können. Parallel geschaltete Tragwerke sind dagegen statisch unbestimmt, wobei die Anzahl der (statisch bestimmten) Stränge um eins grösser ist als der Grad der statischen Unbestimmtheit. Die Parallelschaltung gilt allerdings nur soweit, als die verschiedenen Stränge nicht wieder zusammengefasst sind *(Beispiel 5)*.

Betrachtet man jetzt wiederum die beiden kleinen Regeln von Kette und Seil, so wird allgemein klar, was die Bedeutung der Schaltung für die Sicherheit ist: Bei einer reinen Serieschaltung hat das Versagen eines einzigen Gliedes die Erschöpfung des ganzen Systems zur Folge. (Es ist hier allerdings Vorsicht geboten bei der Abgrenzung des Systems). Es gibt Fälle wie den Gerberträger, wo bei einem Versagen nicht alle Glieder in Mitleidenschaft gezogen werden müssen. Mindestens aber wird jenes Stück in Bewegung geraten, an dem die Kraft angreift.

Bei der Parallelschaltung müssen hingegen alle Stränge an wenigstens einer Stelle erschöpft sein, bevor das Tragwerk nachgibt *(Beispiel 6.2.)*. Eine allgemeine Theorie der Schaltungen der Tragwerke kann hier nicht gegeben werden, da sie wegen der vielen Vereinfachungen der baustatischen Systeme und Methoden ziemlich unübersichtlich würde. Diese Vereinfachungen bedeuten zwar in der Regel eine Verminderung des Arbeitsaufwandes bei der statischen Berechnung; sie lassen dafür die wirklichen Eigenschaften des allgemeinen Falles nicht mehr erkennen. Nur an einem solchen aber können allgemeingültige Sätze einfach formuliert werden. Es mag deshalb genügen, wenn hier die grundsätzlichen Eigenschaften der beiden Schaltungsarten wiedergegeben sind.

Die Bedeutung der Schaltungseigenschaften der Tragwerke im grossen ist nur sinnvoll, wenn als Kriterium der Tragfähigkeit ein kinematischer Bewegungszustand gesetzt wird. Bei der elastischen Theorie ist dies nicht der Fall. Das Kriterium heisst hier einfacher: Das Tragwerk ist dann erschöpft, wenn an irgendeiner Stelle die Elastizitätsgrenze überschritten wird, d.h. wenn in irgendeiner Faser die Voraussetzung des Hookeschen Gesetzes aufhört, gültig zu sein. Dafür wird hier nichts ausgesagt über die «wirkliche» Tragfähigkeit, nämlich die grösste Belastung, die noch auf die Unterlage übertragen werden kann.

Zur Erleichterung der späteren Diskussion ist es noch notwendig, den Begriff der «Bauwerkseigenschaften» zu statuieren. Dazu betrachten wir das Bauwerk als Gesamtheit aller jener Bedingungen oder Umstände, die auf sein Tragverhalten einen Einfluss haben. Neben den inneren Eigenschaften wie Schaltung, Geometrie, Festigkeit usw. gehören somit auch äussere Umstände dazu wie Belastung, Verhalten des Untergrundes und mittelbar auch der Verwendungszweck des Tragwerkes. Dies entspricht nicht dem üblichen Sprachgebrauch, sondern bedeutet eine Erweiterung des Begriffes «Eigenschaft». Es wird aber im folgenden viele komplizierte Beschreibungen ersparen.

3.6. Der Vergleich von Tragfähigkeit und Belastung:

Der Sicherheitsnachweis

Sind die inneren Eigenschaften des Tragwerks und auch die Belastungsannahme festgelegt, so kann die Ungleichung der Sicherheit angeschrieben werden. Sie enthält den im Tragwerk vorhandenen Widerstand (T) und die in der gleichen Form darzustellende Belastungsannahme (P) für jenen Zustand des Tragwerks, der auf seine Tragsicherheit geprüft werden soll. Allgemein sind drei Fälle möglich, wie die Sicherheitsungleichung ausfallen kann:

$$T > P \qquad (9)$$

Diese Aussage bedeutet, dass der Widerstand die Belastung überwiegt, das Tragwerk hält also eine solche Belastung aus.

$$T = P \tag{9a}$$

Ist die Tragfähigkeit gerade gleich gross wie die Belastung, so ist ein Grenzzustand der Sicherheit gegeben, der weiter unten näher erläutert werden soll.

$$T < P \tag{10}$$

Ist die Tragfähigkeit kleiner als die Belastung, so wird das Tragwerk unter den gegebenen Umständen versagen, d.h. in den beschädigten Zustand übergehen. Die Sicherheitsungleichung ist eine physikalische Formulierung der Ereignisse E und E', wie sie in *3.1.* und *3.2.* besprochen worden sind. Somit lauten die hiefür abgeleiteten Wahrscheinlichkeitsbeziehungen:

$$W(E) + W(E') = W(T > P) + W(T < P) = 1 \tag{11}$$

und

$$1 - W(T > P) - W(T < P) = W(T = P) = O \tag{12}$$

Dies ist leicht einzusehen, wenn man, wie es in der Statik üblich ist, den unbestimmten Zustand $T = P$ durch infinitesimale Veränderung der einen Seite

$$P \rightarrow P + dP \tag{13}$$

dem ungünstigen Ereignis E' zuordnet.

Trotzdem wird das Grenzereignis $T = P$ gern verwendet, da es in einem Ausdruck auf die beiden Möglichkeiten E und E' hinweist. Es beschreibt genau das Kriterium der Sicherheit, obwohl es selbst die Wahrscheinlichkeit null besitzt.

Setzt man statt der blossen Ungleichung, die ja nur eine qualitative Information enthält, einen arithmetischen Ausdruck, so erhält man als zahlenmässiges Resultat desselben einen Vergleichswert der Sicherheit, zum Beispiel den Sicherheitsfaktor

$$S = \frac{T}{P} \tag{14}$$

oder die Sicherheitszone

$$Z = T - P \tag{15}$$

Diese Grössen enthalten eine quantitative Aussage über die Sicherheit, die aber nicht mit dem Inhalt des eigentlichen Sicherheitsbegriffes verwechselt werden darf (*3.1.*). Es gilt zwar für ein spezifisches, wohldefiniertes Bauwerk im allgemeinen, dass der Sicherheitsfaktor im gleichen Sinne wie die Sicherheit selbst wächst:

$$\operatorname{sign}\left(\frac{dS}{dT}\right) = \operatorname{sign}\left(\frac{dW(E)}{dT}\right) \tag{16}$$

und

$$\operatorname{sign}\left(\frac{dS}{dP}\right) = \operatorname{sign}\left(\frac{dW(E)}{dP}\right) \tag{17}$$

Bei zwei verschiedenen Tragwerken entspricht nicht notwendigerweise einem grösseren Sicherheitsfaktor auch eine grössere Sicherheit. Ausserdem müssen auch für die obigen Beziehungen gewisse Voraussetzungen erfüllt sein:

$$\frac{dT}{d\alpha} \geq \frac{dP}{d\alpha} \tag{18}$$

das heisst, dass bei einer Veränderung der Tragfähigkeit durch die Variation irgendeines Parameters α der Bauwerkseigenschaften die Tragfähigkeit um einen grösseren Betrag erhöht werden muss als die Belastung (Eigengewicht) oder umgekehrt, dass bei einer Verkleinerung der Tragfähigkeit mit α die Belastung stärker vermindert werden muss. Dies ist vor allem bei grossen Spannweiten von Bedeutung, wo eine Verstärkung der Tragelemente auch eine erhebliche Gewichtsvergrösserung mit sich bringt. Ebenfalls ist diesem Punkt bei den Fällen von Teilbeanspruchungen verschiedenen Vorzeichens (*8.2.*) Beachtung zu schenken.

4. Darstellung und Berechnung der Sicherheit

4.1. Abweichungen, Fehler, Unsicherheiten

Die klassische Baustatik setzt sich darüber hinweg, dass die tatsächlichen Eigenschaften der für die Zukunft projektierten Bauten zur Zeit des Sicherheitsnachweises nicht bekannt sind. Sie benützt für die Berechnung geschätzte Grössen (Annahmen), die dann bei der Bauausführung und beim Gebrauch möglichst mit den gleichen Werten auftreten sollen.

Sind diese Annahmen einmal getroffen, so nimmt die Berechnung nicht mehr weiter Rücksicht auf Abweichungen der «tatsächlichen» von den «Rechen»-Werten, sondern weist sie dem Kapitel «Fehler» zu, die durch entsprechende Sicherheitsmargen kompensiert werden müssen. Diese summarische Behandlung der Abweichungen ist die Konsequenz aus zwei Tatsachen, nämlich dass man Abweichungen oder «Fehler» nie ganz vermeiden kann, und dass man keine Informationen über ihre spezifische Grösse besitzt – sonst hätte man ja die Annahmen verbessern können.

Der Zusammenhang zwischen Fehlern und Sicherheitsmargen bedingt, dass die Abweichungen und ihre Eigenschaften als Grundlage zur Bestimmung der Sicherheitsmassnahmen dienen müssen. Damit das Vorgehen hiezu diskutiert werden kann, soll zuerst eine Übersicht über die Fehler und ihre statistischen Gesetze sowie über die Arten von Informationen, die wir dazu besitzen, gegeben werden.

In der klassischen Fehlertheorie werden die Beobachtungsfehler beim Messen geometrischer Grössen zum Gegenstand genommen und vorerst einmal in drei Klassen gegliedert: Grobe, systematische und zufällige Fehler.

Sodann beschäftigt sich die Fehlertheorie nur noch mit den Eigenschaften der zufälligen Fehler, mit der Annahme, dass man die beiden andern Klassen durch geeignete Massnahmen vorgängig habe ausschalten können.

Eine solche Klassifizierung ist unter den Voraussetzungen günstig, die in der Vermessungskunde gelten:

Die Fehler sind klein gegenüber den gemessenen Grössen, so dass ihre Häufigkeit vom Betrag der gemessenen Grösse unabhängig verteilt ist. Man schliesst daraus auf symmetrische Verteilungen. Beim Messen auf endlosen Skalen (z.B. Messen von Richtungen) gilt übrigens dieser Schluss streng. In der Vermessung können ausserdem die Grösse und die Verteilung der Fehler direkt bestimmt werden, da grosse Messreihen zur Verfügung stehen, die mit dem gleichen Instrument an gleichartigen Grössen gemacht wurden. Ausserdem misst man stets einfache geometrische Grössen, die auf übersichtliche physikalische Referenzen reduziert werden können.

Trotzdem ist diese Klassifizierung eine rein praktische, d.h. sie lässt sich nur empirisch begründen. Die neuere Statistik, von der die Theorie der kleinen Beobachtungsfehler einen Spezialfall bildet, setzt keine solche Unterscheidung zum vorneherein an. Sie macht es sich zur Aufgabe, neben Häufigkeit und Grösse der Fehler auch deren Ursache kennenzulernen.

Für die weitere Diskussion ist es besser, wenn statt des Begriffs der Fehler derjenige der Abweichungen eingeführt wird. Gleich wie in der Fehlertheorie sind die Abweichungen definiert als Differenz zwischen einem tatsächlichen (wahren) und dem beobachteten (gemessenen) Wert der gleichen Grösse:

$$\varepsilon = A_t - A_g$$

Die einzigen Auskünfte, die wir über die mit A_t unbekannten Abweichungen gewinnen können, sind statistischer Art: An bereits bestehenden oder zerstörten Bauten oder an Probestücken können Messungen der tatsächlichen Eigenschaften vorgenommen werden. Diese sind meist viel genauer, als unsere spätere Annahme (statistische Schätzung) sein wird, aber sie beziehen sich nicht auf denselben Gegenstand, nämlich das für die Zukunft projektierte Bauwerk. Das Resultat solcher Messungen sind Häufigkeitsdiagramme (Histogramme), die durch geeignete analytische Funktionen (Verteilungsfunktionen) approximiert werden können.

Wendet man statistische Methoden auf die Gesamtheit der Bauwerke an, so gibt es drei Gründe, weshalb sich keine einwandfreien und in vielen Fällen auch keine brauchbaren Resultate ermitteln lassen.

1. Es gibt Eigenschaften, die sich, bevor das Bauwerk existiert, einer Beobachtung überhaupt entziehen (Verhalten des Untergrundes, Einflüsse von benachbarten Bauten usw.). Auch sie müssen aber in einer Berechnung des Tragverhaltens durch Schätzungen repräsentiert werden. Die damit eingeführten Abweichungen beeinträchtigen ebenfalls die Genauigkeit und Zuverlässigkeit des Resultates der statischen Berechnung. Sie treten aber nicht immer auf, und so sollen sie vorerst nicht betrachtet werden.

2. Das allgemeine Bauwerk ist eine Funktion sehr vieler und verschiedenartiger Eigenschaften (Parameter). Fast immer stehen nur ein einziges oder wenige gleichartige Tragwerke einer Beobachtung zur Verfügung. Will man aber mit statistischen Methoden Resultate gewinnen, die zuverlässig genug sind, um Analogieschlüsse auf zukünftige Bauten zuzulassen, so ist man auf das «Gesetz der grossen Zahl» verwiesen, d.h. die Anzahl der Beobachtungen muss ein möglichst grosses Vielfaches der zu ermittelnden Parameterzahl betragen.

Einzelne Eigenschaften können für sich allein beobachtet werden. Dann führt eine Messung meist zu einem brauchbaren Erfolg. Dies trifft zu für gewisse Festigkeitseigenschaften der Baumaterialien und für klimatische Grössen.

Andere Bauwerkseigenschaften sind aber untereinander so eng verknüpft, dass der Aufwand für die vielen Beobachtungen technisch nicht mehr zu bewältigen ist. Ausserdem kann man verschiedene Grössen, wie zum Beispiel das für die Sicherheit sehr wichtige Verhalten des Tragwerks im Bruchbereich, nur im Zusammenhang mit der Zerstörung von Bauten beobachten. Wohl werden immer wieder Bauten abgebrochen. Diese sind aber meist nach älteren Bauweisen erstellt worden und deshalb in einer Zeit des raschen Wechsels der Technik nicht von grossem Informationswert. Dieser Schwierigkeit – dem Mangel an Objekten für die statistische Beobachtung – hat man durch Testverfahren an Probekörpern abzuhelfen versucht. Da diese aber unter von der Wirklichkeit beim Tragwerk sehr verschiedenen Bedingungen hergestellt und geprüft werden, darf man die Resultate solcher Tests nicht ohne weiteres als zuverlässig annehmen (z.B. Festigkeit von Betonprobekörpern).

3. Unter den Abweichungen, die an den Bauwerkseigenschaften auftreten, gibt es fast immer solche, die nicht durch «normale» Einflüsse bedingt sind, sondern nur eben an einer bestimmten Stelle an einem bestimmten Bauwerk vorkommen. Meist müssen derartige Abweichungen dem direkten menschlichen Einfluss zugeschrieben werden. Wenn in der Einleitung festgestellt wurde, dass statistische Methoden überall dort versagen, wo der menschliche Wille unmittelbar zur Auswirkung kommt, so gilt dies für fast alle Bauwerkseigenschaften. Ausnahmen sind selten und Bauten, bei denen alles als zufällig angesehen werden darf, noch seltener. Solange wir nicht ebenso erschöpfende Informationen über die Grundlagen des menschlichen Handelns besitzen, wie wir sie von gewissen Fabrikationsprozessen oder Naturvorgängen haben, muss dieser Einwand gegen die Anwendung der Statistik beim Sicherheitsproblem der Tragwerke bestehen bleiben. Über diesen äusserst wichtigen Punkt wird in späteren Abschnitten noch die Rede sein *(4.4; 5.2.15)*.

In der klassischen Fehlertheorie wurden die Fehler nach der Grösse (grobe Fehler) und nach dem Vorzeichen (systematische Fehler) für die praktischen Bedürfnisse der Fehler- und Ausgleichungsrechnung unterschieden. Dem soll eine andere Fragestellung gegenübergestellt sein: Die Frage nach der Ursache der Fehler, die gewissermassen implizite allerdings auch bei der Klassifikation der Fehlertheorie inbegriffen war. Im Fall der Sicherheit kommt aber diesem Aspekt grösste Bedeutung zu, und es muss ihm deshalb vermehrtes Gewicht beigemessen werden.

Wir unterscheiden:

1. Nicht direkt durch den Menschen beeinflusste Abweichungen. Sie sind bis zu einem gewissen Grade unvermeidlich und sollen in der Folge als zufällig bezeichnet werden.

2. Abweichungen, die als direkte Ursache das menschliche Versagen haben – in der Form von Fahrlässigkeit, Unwissenheit, Willkür. Sie können weitgehend durch geeignete Massnahmen eliminiert werden, was natürlich wiederum einen entsprechenden Aufwand bedingt. Sie sollen als grobe Fehler bezeichnet werden.

Die Klasse der systematischen Fehler wird hier nicht berücksichtigt. Qualitativ kann man das so begründen: Die systematischen Abweichungen beeinflussen jedes Stück einer Beobachtungsreihe in gleicher Weise. Sie gehören somit nicht zu den Abweichungen, sondern zu den tatsächlichen Eigenschaften der Stücke. Meist rühren sie von der Messmethode oder den Messmitteln her und müssen, wo sie betragsmässig eine Rolle spielen, durch Verbesserung derselben ausgeschaltet werden. Ein Beispiel dafür sind die Prüfungen von Betonproben. Wohl sind die Messmittel gut genug; die Festigkeit der Prüfkörper kann sehr genau gemessen werden. Der systematische Fehler tritt bei der Substitution der gewonnenen Daten auf das tatsächliche Bauwerk auf. Grundsätzlich ist dies somit einer fehlerhaften Analogie zuzuschreiben, und es geht daraus hervor, dass das Prüfen von Probekörpern auf ihre Festigkeit hin oft nicht von grossem Wert ist.

Die Klassifikation der Fehler nach ihrer Ursache lässt sich wohl nicht schärfer durchführen, als dies mit den Annahmen der Fehlertheorie gegangen ist. Sie wird sich aber für die weitere Diskussion besser eignen.

Es soll auch versucht werden, die mathematischen Eigenschaften der beiden Fehlerklassen zu untersuchen (Ende dieses Abschnittes). Vorläufig sei die Ursache eines groben oder vermeidbaren Fehlers einfach durch das Abgehen von Regel und Sorgfalt bei der Erstellung und Benützung der Bauten beschrieben.

Für die zufälligen Abweichungen lassen sich in der Regel Verteilungsfunktionen ermitteln. Für die groben Fehler müssen wir annehmen, dass sie in weiten Grenzen beliebige Werte annehmen können.

Dies zeigt sich eindrücklich bei allen Bauunfällen. Fast immer wurde schliesslich das Wirken menschlicher Unzuverlässigkeit als Ursache eines groben Fehlers entdeckt, der dann zum Versagen des Tragwerks führte. Dass die hiezu nötigen Untersuchungen durchgeführt werden, ist dem Betreiben der Jurisdiktion zuzuschreiben, die über die Schuldfrage zu urteilen hat, und die nur in den wenigsten Fällen die Schuld an einem Verlust etwas anderem als dem menschlichen Handeln und Unterlassen zumisst.

Die rechtliche Seite solcher Vorkommnisse ist aber hier nicht von Belang, sondern die Frage heisst, wie ihnen zu begegnen sei. Die juristische Deutung eines Unfalles ist eine blosse Nachbehandlung, das Urteil ein Nachurteil. Aufgabe des Sicherheitsnachweises aber ist es, für jedes Tragwerk ein Vor-Urteil zu formulieren, das ein Bild seines künftigen Verhaltens und die begründete Voraussage dafür enthält, dass es seiner Belastung standhalten wird.

Zu diesem Zweck sind Methoden abzuleiten, die über das Auftreten von Abweichungen Auskunft geben und verhindern, dass diese gross genug werden, um Unfälle zu erzeugen.

Die Frage nach der Art solcher Methoden lässt sich für die beiden Klassen von Abweichungen gesondert ziemlich eindeutig und einfach beantworten:

Gegen die unvermeidlichen zufälligen Abweichungen schützen Sicherheitsmargen.

Gegen die Folgen menschlichen Unvermögens, die groben Fehler, schützen Kontrollmassnahmen.

Da allerdings kein genaues Kriterium bekannt ist, nach dem die beiden Klassen von Abweichungen getrennt werden könnten, ist dieses kurze Rezept entsprechend unscharf. Immerhin kann man zeigen, dass es im allgemeinen sinnvoll ist, nach diesem Schema zu verfahren.

Als Mass für die zufälligen Abweichungen verwendet man die «mittlere quadratische Abweichung» (mittlerer Fehler), die sich aus einer Beobachtungsreihe schätzen lässt nach der Formel:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\Sigma\,(\tilde{x} - l_i)^2}{n-1}} \tag{19}$$

Darin bedeutet $\tilde{x}$ den Median der Verteilungsfunktion, l_i die einzelnen Beobachtungen, n die Anzahl der Beobachtungen. Im Fall einer Prognose für die Zukunft steht dafür ein Erwartungswert, den man aus analogen Beobachtungen für das künftige Bauwerk extrapoliert. Dieses Fehlermass hat sich in der Ausgleichungsrechnung nach der Methode der kleinsten Quadrate *(Gauss)* und in der Statistik als sehr günstig erwiesen, weil es auf einfache Rechnungen führt und sich auch durch andere vorteilhafte Eigenschaften vor andern Fehlermassen auszeichnet. Der Median einer Verteilung ist gegeben durch die Regel, dass die Hälfte aller Messwerte kleiner, die andere Hälfte grösser sein soll. Er fällt für symmetrische Verteilungen mit dem Mittelwert, für solche, die der Gaussschen Normalverteilung ähnlich sehen, auch mit dem Modus (Häufigkeitsmaximum) zusammen.

In vielen Fällen setzt man den mittleren Fehler ins Verhältnis zur gemessenen Grösse selbst (Median) und erhält den Variationskoeffizienten

$$v_x = \frac{\sigma_x}{\tilde{x}} \tag{20}$$

Er eignet sich für gewisse Operationen und vor allem für quantitative Diskussionen besser als der mittlere Fehler selbst.

Die meisten Bauwerke haben sehr viele verschiedene Eigenschaften, die ihrerseits als Parameter in der statischen Berechnung oder Bemessung erscheinen. Damit man sich bei der Betrachtung derselben und ihrer Abweichungen nicht verliert, ist es notwendig, die Parameter nach gewissen Gesichtspunkten zu ordnen. Für die folgenden vier Gruppen von Parametern soll angenommen werden, dass ihre Verteilungen gegenseitig unabhängig sind, d.h. zwischen der einen und der andern Gruppe keine Korrelation besteht. Die vier Grundparameter sind:

1. Festigkeitseigenschaften der Baumaterialien;
2. Geometrie des Tragwerks, statisches System und Abmessungen der Querschnitte;
3. Belastung;
4. Verhalten des Untergrundes.

Sie beeinflussen das Tragverhalten des Bauwerks direkt, und Abweichungen können bei jeder der vier Gruppen in solchen Beträgen vorkommen, dass sie für die Sicherheit bedeutungsvoll sind.

Aus Untersuchungen der letzten Zeit über einzelne Parameter (vor allem Festigkeitseigenschaften und Belastung) lassen sich gewisse Schlüsse auf ihre statistischen Eigenschaften ziehen [41 bis 45].

Da es sich bei den Abweichungen, die für die Sicherheit eine Rolle spielen, stets um solche von bedeutender Grösse handelt (Variationskoeffizienten von 5% und mehr), fällt die Annahme von der Symmetrie der Verteilungsfunktionen dahin, die in der Theorie von den kleinen Beobachtungsfehlern gilt. Plausibel ist dies auch deshalb, weil für die meisten Bauwerkseigenschaften der Wert null eine einseitige Grenze bedeutet, während symmetrische Verteilungen meist nach beiden Seiten hin unbegrenzt sind. Man führt dann in der Regel schiefe Verteilungen ein, deren drittes Moment

$$m_3 = \frac{\Sigma\,(\bar{x} - l_i)^3}{n} \qquad (21)$$

nicht verschwindet. Dass gewisse Grössen im Bauwesen (Festigkeit von Materialien, Belastungen usw.) schiefe Verteilungen haben müssen, findet man auch durch entsprechende Histogramme bestätigt. Ein Beispiel für die unsymmetrischen Verteilungsfunktionen ist die logarithmisch-normale Verteilung von der Form:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \log x \cdot x \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot lxp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\log x - M \log x}{\sigma \log x}\right)^2\right) \qquad (22)$$

die durch Logarithmieren der x-Achse in eine Gausssche Normalverteilung übergeht.

Bevor wir zur Diskussion der Sicherheit auf Grund von Fehlerverteilungen übergehen, muss noch das wenige Verfügbare über jene Abweichungen rekapituliert werden, die durch menschliche Nachlässigkeit usw. verursacht werden. Da diese «groben» Fehler überall und in mannigfaltiger Form vorkommen, ist es bis heute nicht gelungen, genügend Daten zu sammeln, die Schlüsse erlauben würde, welche weit über rein qualitativ-plausible Erklärungen hinausgehen.

Nimmt man für die groben Fehler an, dass sie eine Verteilung haben, so lassen sich immerhin gewisse Aussagen machen.

Wie bei den zufälligen Abweichungen müssen auch bei den groben die grossen seltener sein als die kleinen. Dies ist leicht einzusehen: Je grösser ein Versehen, desto eher fällt es auf und wird korrigiert.

Die Verteilung der groben Fehler muss ebenfalls nach beiden Seiten gegen null konvergieren. Diese Aussage ist zwar im Vorangehenden schon enthalten, sie kann aber noch schärfer begründet werden. Meist lässt sich zeigen, dass die Parameter der Bauwerke als physikalische Phänomena ihrem Betrage nach begrenzt sind, weil es technisch unmöglich ist, darüber hinaus zu kommen. Wo zum Beispiel der Nullpunkt sinnvollerweise eine Begrenzung darstellt, gilt diese selbstverständlich auch für die groben Fehler. Ein Beispiel dafür sind alle Festigkeitsgrössen. Auch für Belastungen kann man ähnliche Grenzen formulieren: Auf einer Brücke können keine schwereren Fahrzeuge verkehren, als überhaupt auf den Strassen des Landes zu finden sind; in einen Behälter kann man nicht mehr einfüllen, als bis er voll ist. Ähnliche Aussagen lassen sich auch direkt erzeugen, zum Beispiel für die Tragfähigkeit eines Bauwerks mit einer Belastungsprobe: Das Tragwerk, das die Probebelastung ausgehalten, wird unter einer kleineren Belastung nicht einbrechen, ausser es handle sich um ein Langzeitproblem.

Weitere Informationen über die groben Fehler wären aus Stichproben zu gewinnen, die man mit oder ohne Einfluss der groben Fehler beobachten kann. Der Unterschied der beiden Verteilungen ist dann die Wirkung der groben Fehler.

Dieses Vorgehen wurde auch schon angewandt, z.B. auf die Verteilung der Festigkeit von Betonprobewürfeln [42], die mit gut und schlecht kontrolliertem Beton hergestellt worden waren. Aus den beiden Histogrammen ergeben sich ganz wesentliche Unterschiede, vor allem in der Streubreite der Probenfestigkeiten. Dies deutet darauf hin, dass der Schluss richtig war, der hiess: Der wesentliche Anteil der grossen (groben) Fehler ist vermeidbar und rührt von der mangelnden Sorgfalt des Menschen her. Dasselbe wird sich ergeben, wenn wir die Gesamtheit der Bauwerke betrachten (*4.4.*).

4.2. Abweichungen und Sicherheit

Im folgenden soll der Zusammenhang zwischen den zufälligen, also statistisch erfassbaren Fehlern und der Sicherheit hergestellt werden. Die groben Abweichungen werden bis und mit Abschnitt *4.3.* als nicht vorhanden betrachtet – im Sinne einer Arbeitshypothese.

Der Inhalt der Sicherheitsungleichung

$$T > P \qquad (23)$$

kann durch eine einzige Grösse beschrieben werden, zum Beispiel durch den Sicherheitsfaktor:

$$S > 1 \qquad (24)$$

Das Schadenereignis E' oder

$$T < P \qquad (25)$$

liegt dann vor, wenn

$$S < 1 \qquad (26)$$

Somit kann also nach dem Wert des Sicherheitsfaktors auf die Sicherheit des Bauwerks geschlossen werden. Ist er mit seinem wahren Wert bekannt, so ist auch entschieden, ob das Tragwerk, auf das er sich bezieht, Schaden erleidet oder nicht. Der Sicherheitsfaktor ist aber mit

$$S = \frac{T}{P} \quad (27)$$

auch eine Funktion der Bauwerkseigenschaften, und es fragt sich, ob aus deren Verteilung auf eine Verteilung des Sicherheitsfaktors geschlossen werden kann. Dies soll vorerst einmal vermutet werden, damit, bevor wir es zeigen, zuerst auf die Konsequenzen hingewiesen werden kann.

Ist nämlich die Verteilung $f(S)$ des Sicherheitsfaktors bekannt, so kann durch eine einfache Integration:

$$F(S^*) = \int_{-\infty}^{S^*} f(S) dS \quad (28)$$

die Wahrscheinlichkeitsfunktion bestimmt werden, die für jeden Wert von S^* die Wahrscheinlichkeit dafür angibt, dass S^* durch den wahren Wert von S unterschritten wird:

$$F(S^*) = W(S \leq S^*) \quad (29)$$

Setzt man insbesondere für S^* den kritischen Wert eins, so erhält man die Sicherheit aus:

$$1 - F(1) = 1 - W(S \leq 1) = W(S > 1) = W(E) \quad (30)$$

Sie lässt sich also an der Verteilungsfunktion des Sicherheitsfaktors abgreifen [*Abb. 6*].

Setzen wir nun den Sicherheitsfaktor als Funktion der Parameter der Bauwerkseigenschaften:

$$S = S(a_1, \ldots a_i, \ldots a_n) \quad (30a)$$

deren Verteilungen $f(a_i)$ bekannt sein sollen, so lässt sich die Wahrscheinlichkeitsfunktion des Sicherheitsfaktors berechnen nach der Formel:

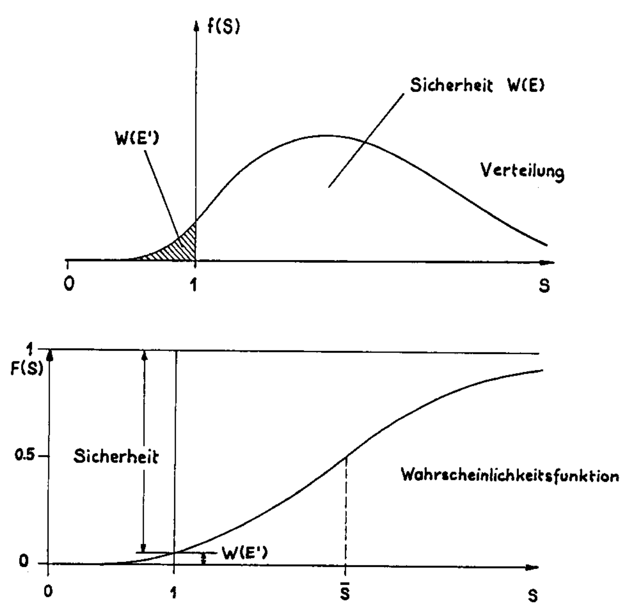


Abb. 6

$$F(S^*) = \left\{ \int \ldots \int \left[\prod_1^n (f(a_i) da_i) \right] \right\}_G \quad (31)$$

wobei das Gebiet G im n-dimensionalen Raum der a_i begrenzt ist durch die Ungleichung:

$$S(a_1, \ldots . a_n) \leq S^* \quad (32)$$

Differenziert man nach S^*, so entsteht daraus die Verteilung des Sicherheitsfaktors:

$$f(S^*) = \frac{d}{dS^*}(F(S^*)) \quad (33)$$

Somit kann die Sicherheit für jedes Bauwerk berechnet werden, bei dem die Verteilungen der Bauwerkseigenschaften sowie deren Beziehungen zum Sicherheitsfaktor gegeben sind (Formel 30a). Ein einfaches Beispiel mag den grundsätzlichen Rechnungsgang kurz erläutern:

Beispiel: Ein statisch bestimmt gelagerter Stahlbetonbalken sei durch ein Biegemoment aus einer verteilten Belastung beansprucht. Es beträgt in Feldmitte:

$$\bar{M} = \frac{p \cdot l^2}{8} \quad (34)$$

Der Widerstand des Querschnitts in Feldmitte ist durch das plastische Moment (Bruchkriterium)gegeben:

$$\bar{M}_p = \sigma_F \cdot Fe \cdot h \left[1 - 0{,}6 \frac{\sigma_F \cdot Fe}{b \cdot h \cdot \beta_D}\right] \quad (35)$$

Daraus lässt sich der Sicherheitsfaktor errechnen:

$$\bar{S} = \frac{\bar{M}_p}{\bar{M}} = \frac{\sigma_F \cdot Fe \cdot h \left[1 - 0{,}6 \frac{\sigma_F \cdot Fe}{b \cdot h \cdot \beta_D}\right]}{p \cdot l^2 \cdot \frac{1}{8}} \quad (36)$$

Sein Betrag sei:

$$\bar{S} = 2{,}0$$

Alle Grössen seien durch ihren Median (Rechenwert) eingeführt worden. Somit ist auch der Wert des Sicherheitsfaktors gleich dem Median seiner Verteilung. Er soll von hier an als «Nominalwert» bezeichnet werden. Die am meisten streuenden Elemente von S sind:

die statische Höhe h
die Fliesspannung des Stahles σ_F
die Belastungsannahme p

Abweichungen der anderen Grössen sind entweder unbedeutend (Fe, l) oder aus formalen Gründen von geringem Einfluss (b, β_D). Sie werden vernachlässigt. Ebenfalls weggelassen wird die Streuung des zweiten Summanden in der Klammer, weil er gegen die Einheit klein ist und somit auch sein Fehlereinfluss entsprechend gering ausfällt.

Die veränderlichen Elemente lassen sich zusammenfassen:

$$\Phi = \frac{\sigma_F \cdot h}{p} \quad (37)$$

und die unveränderlichen ebenfalls:

$$A = \frac{8 \cdot Fe}{l^2} \cdot \left(1 - 0{,}6 \cdot \frac{Fe \cdot \sigma_F}{b \cdot h \cdot \beta_D}\right) \quad (38)$$

Um Verwechslungen vorzubeugen, werden die veränderlichen Grössen umbenannt:

$$\sigma_F = a_1$$
$$h = a_2$$
$$p = a_3$$

und wir können den Sicherheitsfaktor anschreiben:

$$S = \frac{a_1 \cdot a_2}{a_3} \cdot A \tag{39}$$

Die Verteilungen der drei Variablen seien:

$$f(a_1) = \frac{1}{a_1 \cdot \sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{\log a_1}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\log a_1 - \mu_{\log a_1}}{\sigma_{\log a_1}}\right)^2\right) \tag{40}$$

$$f(a_2) = \frac{1}{4\sqrt{3}} \qquad a_{2\,min} \leq a_2 \leq a_{2\,max} \tag{41}$$

$$f(a_3) = \frac{1}{a_3 \cdot \sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{\log a_3}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\log a_3 - \mu_{\log a_3}}{\sigma_{\log a_3}}\right)^2\right) \tag{42}$$

mit den Parameterwerten:

$$\begin{aligned} \mu_{\log a_1} &= \log 3{,}6 & \sigma_{\log a_1} &= \log\left(\frac{20}{19}\right) \\ a_{2min} &= 30\text{–}2\sqrt{3} & a_{2max} &= 30 + 2\sqrt{3} \\ \mu_{\log a_3} &= \log 0{,}1 & \sigma_{\log a_3} &= \log\left(\frac{12}{11}\right) \end{aligned} \tag{43}$$

Die Verteilungen von a_1 und a_3 sind logarithmisch-normal. Für die Fliesspannung des Stahles lässt sich dies anhand von Histogrammen über diese Grösse als vernünftig ersehen. Bei der Belastung kann man die logarithmisch-normale Verteilung als Möglichkeit einer Verteilung des Extremwertes und in Ermangelung genauerer Auskünfte vorschlagen. Die statische Höhe ist rechteckig verteilt, was etwa dem Fall einer Toleranzkontrolle mit den Grenzen $\pm$ 2 cm entspricht. Die Nominalwerte der drei variablen Grössen entsprechen mit

$$\begin{aligned} \bar{a}_1 &= \bar{\sigma}_F = e^{\log 3{,}6} = 3{,}6\ [\text{t/cm}^2] \\ \bar{a}_2 &= \bar{h} \ = 30\ \text{cm} \\ \bar{a}_3 &= \bar{p} \ = e^{\log 0{,}1} = 0{,}1\ [\text{t/m}^1] \end{aligned} \tag{44}$$

etwa üblichen Verhältnissen, die Variationskoeffizienten ebenfalls:

$$\begin{aligned} v_1 &= e^{\sigma \log a_1} \cong \pm 5\% \\ v_2 &= \pm 6{,}7\% \\ v_3 &= e^{\sigma \log a_3} \cong \pm 8\% \end{aligned} \tag{45}$$

$\mu \log a_1$ bedeutet dabei den Logarithmus des Medians von a_1, $\sigma_{\log\, a_1}$ die mittlere quadratische Abweichung des Logarithmus gegenüber dem Median.

Man gewinnt nun die Wahrscheinlichkeitsfunktion des Sicherheitsfaktors aus der Formel:

$$F(S^*) = \int\!\!\int\!\!\int_{-\infty}^{S^*} f(A \cdot a_1) \cdot f(a_2) \cdot f(a_3) \cdot da_1 \cdot da_2 \cdot da_3 \tag{46}$$

Da eine solche Rechnung analytisch nicht mehr möglich ist, wurde sie mit einem numerischen Verfahren auf einem Rechenautomaten gelöst. Das Resultat ist in *Abbildung 7* dargestellt. Zum Vergleich sind die Normalverteilung und die *Tschebischeffsche* Ungleichung zu den gleichen Parametern (Median, Variationskoeffizient) beigegeben. Der Masstab für $F(S)$ ist logarithmisch gewählt, damit der Verlauf der Funktion auch für kleine Werte von S noch übersichtlich bleibt.

Die beiden Vergleichskurven stehen in verschiedener Beziehung zur «tatsächlichen» Verteilung von S:

Die *Tschebischeffsche* Ungleichung bildet eine absolute obere Grenze für alle Verteilungen. Sie ist aber für die

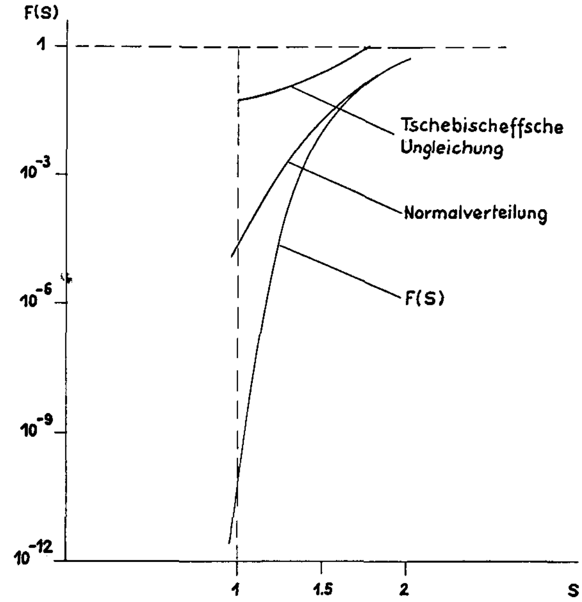


Abb. 7

Diskussion unbrauchbar, weil sie auch für sehr kleine Werte von S noch sehr hoch liegt.

Eine bessere Approximation ist die *Gausssche* Normalverteilung. Sie führt aber, wie sich im Beispiel von Abschnitt *4.3.* ergeben wird, ebenfalls auf sinnlose Schlüsse über die notwendigen Sicherheitsmargen. Immerhin gibt sie, wie aus *Abbildung 7* ersichtlich, für kleine Werte von S eine obere Schranke. Da sie zudem auf einfache Rechnungen führt, soll sie, solange es möglich ist, in der Diskussion verwendet werden [223].

Der Sinn einer Approximation ist, dass Abschätzungen der Sicherheit aus statistischen Daten der Parameter gerechnet werden können, ohne dass der Aufwand so gross wird wie etwa im gezeigten Beispiel, das sich ohne weiteres auch auf empirische Verteilungen anwenden liesse. Die symmetrische Normalverteilung kann für die Fälle der Bautechnik im allgemeinen als obere Grenze angesehen werden, weil die Daten der Tragwerke meist schief verteilt sind mit einer einseitigen Schranke beim Nullpunkt. Das bedeutet, dass die Sicherheit bei Verwendung der Normalverteilung unterschätzt wird und somit eine solche Approximation auf der sicheren Seite liegt.

Eine viel genauere Näherung ist allerdings die logarithmisch-normale Verteilung, von der weiter unten noch die Rede sein wird (*4.3.*).

4.3. Die Sicherheit als Bemessungsparameter

Bis hieher wurde der eigentliche Sicherheitsnachweis behandelt, der auf die Frage nach der Sicherheit eines Tragwerks Antwort gibt, wenn dessen Daten (Nominalwerte, Streumasse) festgelegt sind.

Da der Sicherheitsnachweis in diesem Sinne ein Nachurteil ist, das sich erst an eine vollständige statische Berechnung anknüpfen lässt, ist für die endgültige Dimensionierung ein Iterationsprozess erforderlich, so nämlich, dass dem ersten Resultat des Sicherheitsnachweises eine neue statische Berechnung mit veränderten Daten zu folgen hat, bis die Sicherheitsforderung, etwa in Form eines Sicherheitsfaktors, befriedigt ist. Auch Fälle, bei denen der verlangte Sicherheitsfaktor überschritten wird, müssen aus wirtschaftlichen Gründen neu gerechnet werden. Ein solcher Iterationsprozess ist aber bei ausgedehnteren Berechnungen sehr mühsam und zeitraubend. Das führte schon früh zur Fragestellung: Kann nicht die Frage nach der Sicherheit so gestellt werden, dass sie in einer direkten Bemessung untergebracht werden kann und nicht eine Wiederholung des Rechenaufwandes erfordert? Methodisch ausgedrückt bedeutet das, dass die Sicherheit explizite als Bemessungsparameter neben den andern Daten des projektierten Tragwerks eingeführt werden könnte.

Das grundsätzliche Vorgehen nach den beiden Fragestellungen ist in *Abbildung 8* und *9* dargestellt. Es lässt sich aus dem Schema leicht ersehen, dass die direkte Bemessung unter viel geringerem Aufwand zum Ziele führt.

Im Fall einer direkten Bemessung wird auch für die statische Berechnung die Fragestellung umgekehrt: Wo beim Sicherheitsnachweis die Daten der Tragwerke als Anfangswerte des Iterationsprozesses festgelegt waren, bleiben sie bei der direkten Bemessung zum Teil für eine Variation offen. Statt dessen wird hier die Sicherheit oder eine davon abgeleitete Vergleichszahl vorgegeben, die dann durch die Variation der Bemessungsgrössen (statische Höhe, Armierungsgehalt usw.) erreicht werden muss.

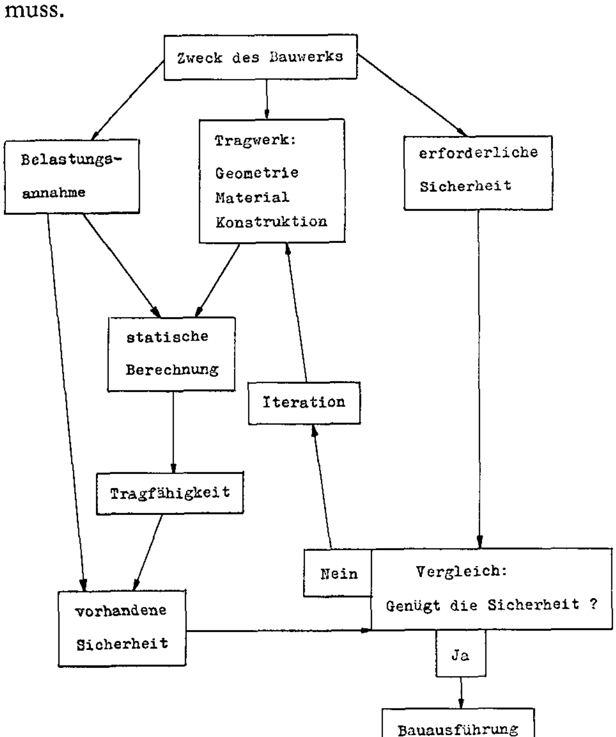


Abb. 8

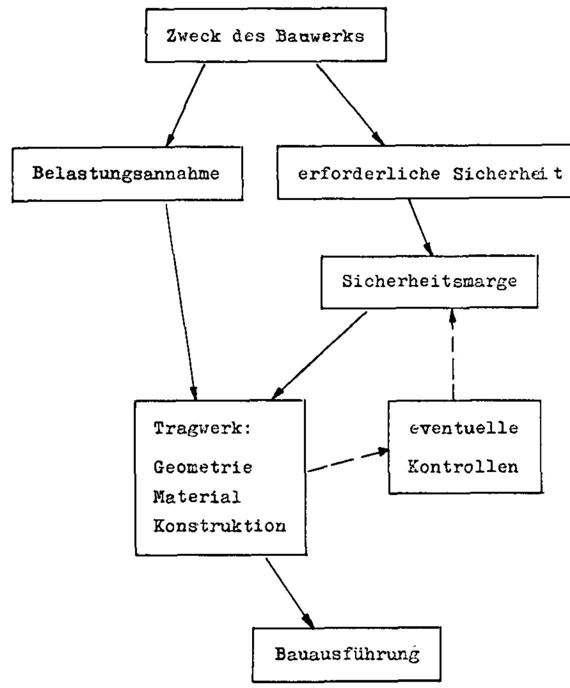


Abb. 9

Da der Sicherheitsfaktor die einfachste Form des Sicherheitsbeiwertes ist, soll die weitere Untersuchung an ihm durchgeführt werden. Er lässt sich leicht in andere Vergleichswerte überführen.

Die Sicherheit eines Tragwerks steht schon vor der Wahl der Daten fest. Dies gilt jedoch nicht für die Sicherheitsbeiwerte (Sicherheitsmargen), die nach *4.1.* direkt von den statischen Eigenschaften der Parameter abhängen. Auch diese müssen aber einmal angenommen werden, bevor der eigentliche Gang der Bemessung beginnt. Dann kann auch der Sicherheitsbeiwert festgesetzt werden, was sich allerdings auf die Annahme gründet, dass die relativen Abweichungen (Variationskoeffizient) der zur Bemessung variierten Daten unabhängig von der Grösse derselben seien. Diese Voraussetzung gilt insbesondere nicht für die Abmessungen der Querschnitte (*5.2.12.*). Deshalb wird für diesen Einfluss eine besondere Abstufung der Sicherheitsmargen notwendig.

Der Versuch, Sicherheitsbeiwerte aus den statistischen Eigenschaften der Tragwerke abzuleiten, bezieht sich auf die Zusammenhänge, die im letzten Abschnitt gewonnen worden sind. Der Einfachheit halber wird vorerst mit der *Gaussschen* Normalverteilung operiert. Wo diese als schlechte Näherung nicht mehr genügt, tritt an ihre Stelle die logarithmische Normalverteilung.

Der wahre Wert des Sicherheitsfaktors lässt sich als Summe von Nominalwert und Abweichung auffassen:

$$S = \bar{S} + \Delta S \tag{47}$$

Die Abweichung ΔS ist nach der Arbeitshypothese von *4.2.* eine rein zufällige Grösse. Ihre Verteilung kann man aus den Verteilungen der Parameter des Sicherheitsfaktors berechnen (46). Gesucht ist jetzt der Nominalwert $\bar{S}$, der mit der Abweichung zusammen mit einer genügenden Sicherheit den wahren Wert S grösser als eins werden lässt (24).

Wir stellen die Abweichung als ein Vielfaches der Standardabweichung dar:

$$\Delta S = g \cdot \sigma_S \tag{48}$$

und fragen endlich nach der Zahl g, die in Beziehung steht mit der Verteilung von S.

Setzen wir zum Beispiel als Sicherheitsvorschrift fest, dass im Mittel jedes millionste Bauwerk aus zufälligen Ursachen versagen darf, so ergibt sich aus einer Tabelle für das Fehlerintegral (Normalverteilung [145]):

$$g \sim 4{,}5$$

und wir erhalten die notwendige Sicherheitsmarge aus der Beziehung:

$$1 \leq \bar{S} - g \cdot \sigma_S = \bar{S} - 4{,}5 \cdot v_S \cdot \bar{S} \tag{49}$$

zu:

$$\bar{S} \geq \frac{1}{1 - g \cdot v_S} = \frac{1}{1 - 4{,}5 \cdot v_S} \tag{50}$$

Für diesen Wert ist nach *Tabelle*

$$F(1) = W(S \leq 1) = 10^{-6} \tag{51}$$

wie es festgesetzt war. Damit ist die Aufgabe grundsätzlich gelöst. Wir haben eine gewisse Sicherheit verlangt und die Verteilungsfunktion des Sicherheitsfaktors gegeben. Daraus fanden wir den notwendigen Nominalwert des Sicherheitsfaktors. Dieser kann nun in der Bemessung eingesetzt werden wie ein anderer Parameter, zum Beispiel die Belastungsannahme, und die Tragfähigkeit wird durch geeignete Variation der Querschnittswerte oder Materialeigenschaften auf einen Wert gebracht, der die Bemessungsbedingung

$$\bar{P} \cdot \bar{S} \leq \bar{T} \tag{52}$$

erfüllt.

Aus dem Ausdruck für den Sicherheitsfaktor (50) geht nun aber hervor, dass der Wert von $\bar{S}$ für grössere Variationskoeffizienten v_S sehr schnell gegen grosse Zahlen läuft. Ist der Variationskoeffizient gerade

$$v_S = \frac{1}{g} \tag{53}$$

so müsste schon eine unendlich grosse Sicherheitsmarge eingesetzt werden, damit die gewünschte Sicherheit noch erreicht werden könnte. Dies entspricht offenbar nicht den tatsächlichen Verhältnissen, und es geht daraus hervor, dass die symmetrische Normalverteilung als Näherung nicht mehr verwendbar ist. Wir setzen dafür die logarithmisch-normale Verteilung, und wir erhalten entsprechend (50) die Bestimmungsgleichung für den Nominalwert des Sicherheitsfaktors:

$$\exp(\mu_{\log S} - g \cdot \sigma_{\log S}) = 1 \tag{54}$$

Sie führt mit

$$\mu_{\log S} = \log \bar{S} \tag{55}$$

auf

$$1 = \exp(0) = \exp(\log \bar{S} - g \cdot \sigma_{\log S}) \tag{56}$$

und der erforderliche Sicherheitsfaktor ergibt sich zu:

$$\bar{S} = \exp(g \cdot \sigma_{\log S}) \tag{57}$$

Zum Vergleich ist die Beziehung zum Sicherheitsfaktor für die normale und logarithmisch-normale Verteilung bei zwei verschiedenen Variationskoeffizienten in Abbildung 10 dargestellt.

Die Wahl der logarithmisch-normalen Verteilung als bessere Näherung der «tatsächlichen», aus verschiedenen Verteilungen der einzelnen Parameter bestimmten bedarf noch einer besseren Begründung, als sie bis hieher gegeben werden konnte.

Nach dem zentralen Grenzwertsatz gilt:

Ist A die Summe von n Summanden, die beliebige Verteilungen haben können, so nähert sich mit wachsendem n die Verteilung von A einer normalen. Analog dazu lässt sich daraus ableiten: Ist B das Produkt von m Faktoren, die ebenfalls beliebige Verteilungen haben können, so nähert sich mit wachsendem m die Verteilung von B einer logarithmisch-normalen. Der zentrale Grenzwertsatz gilt allerdings nur unter gewissen, aber ziemlich weiten Voraussetzungen, vor allem über die Schiefe der beteiligten Verteilungen.

Die Frage ist nun, ob sich diese Feststellungen auch auf den Sicherheitsfaktor anwenden lassen. Und in der Tat lässt sich im allgemeinen der Sicherheitsfaktor als Produkt seiner Parameter anschreiben. Für den Fall der reinen Biegung ist dies in Beispiel *4.2.* gezeigt worden. Nimmt man an, dass der Faktor A der nichtstreuenden Elemente doch eine Verteilung besitze, so ist der Sicherheitsfaktor ein Produkt aus vier Gliedern:

$$S = A \cdot \sigma_F \cdot b \cdot \frac{1}{p} \tag{58}$$

Abweichungen von der asymptotischen logarithmisch-normalen Verteilung können nun auch davon herrühren, dass $m = 4$ eine zu kleine Zahl ist. Da aber ein Teil der einzelnen Verteilungen der Parameter bereits einer logarithmisch-normalen ähnlich sehen, wird diese Einschränkung wieder kompensiert.

Der stärkste Einwand, der gegen die Approximation mit Hilfe der logarithmisch-normalen Verteilung ausgesprochen werden kann, bezieht sich auf unsere Beanspru-

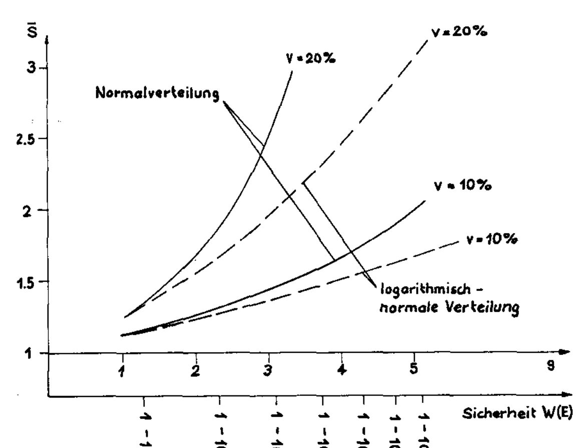


Abb. 10

chungen als die reine Biegung, wo sie auf inhomogene Querschnitte wirken (Stahlbeton). In diesem Fall wirken zwei verschiedene Materialien additiv an der Tragfähigkeit des Querschnittes mit, und der Sicherheitsfaktor enthält eine Summe. In den meisten Fällen wird es aber so sein, dass der eine Baustoff in der Summe der Teilwiderstände überwiegt und somit seine Verteilung für diejenige von S massgebend ist, womit der Fall der Produktfunktion wieder näherungsweise gegeben ist (siehe z.B. für zentrischen Druck bei *4.5.1.*).

Schliesslich seien noch die beiden Regeln für die Übertragung der Fehlermasse der Parameter auf dasjenige des Sicherheitsfaktors gegeben:

Für die Normalverteilung gilt nach der Methode der kleinsten Quadrate:

$$\sigma_S = \left(\sum_1^n \sigma_i^2\right)^{\frac{1}{2}} \tag{59}$$

Für die logarithmisch-normale Verteilung ist entsprechend:

$$\sigma_{\log S} = \left(\sum \sigma^2_{\log \alpha_i}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{60}$$

Die beiden Gleichungen finden sich in der Literatur unter dem Namen «Fehlerfortpflanzungsgesetz» oder «Additionstheorem der Varianzen» (σ^2). Sie gelten in dieser einfachen Form nur für nichtkorrelierte Grössen α_i.

Mit der Bestimmung des erforderlichen Sicherheitsfaktors aus den statistischen Daten der Bauwerke ist ein gangbarer Weg gefunden, um die Sicherheitsmargen nach statistischen Grundlagen festzulegen. Allerdings müssen zwei gewichtige Voraussetzungen erfüllt sein, damit dieser Weg zu richtigen Resultaten führt.

1. Die statistischen Daten müssen genügend genau gegeben sein. Damit kann aber zum heutigen Zeitpunkt in den wenigsten Fällen gerechnet werden. Vor allem müssten wir viel bessere Informationen über die Belastungen und die Massgenauigkeiten sowie über gewisse Eigenschaften des Untergrundes besitzen. Die Anwendbarkeit der statistischen Methode ist deshalb vorerst auf ein recht kleines und spezielles Gebiet von Bauten beschränkt: Hochgradig statisch unbestimmte Systeme (parallel geschaltet), einfache Fälle von vorfabrizierten Elementen unter einer Belastung, die statistisch erforscht ist (Wind, Schnee, Wasserabflüsse usw.).

2. Die Methode ist nur dann brauchbar, wenn die angewandten Verteilungsfunktionen auch für die extremen Abweichungen gelten. Dies ist bisher auch für rein zufällige Parameter noch nie durch Beobachtungen belegt worden. Ausserdem muss gerade bei den grossen, seltenen Abweichungen mit dem meistens sehr starken Einfluss der groben (menschlich bedingten) Fehler gerechnet werden. Um diesen Einwand ein bisschen näher zu untersuchen, handelt der nächste Abschnitt speziell von den extremen Abweichungen.

4.4. Die extremen Abweichungen, Erfahrungswerte

Für gewisse Parameter der Bauwerke stehen statistische Ergebnisse zur Verfügung. Weitere können mit tragbarem Aufwand gewonnen werden. Sie beziehen sich aber immer auf mehr oder weniger beschränkte Stichprobenzahlen – einige hundert bis wenige tausend. Das bedeutet für die ermittelten Verteilungen, dass wohl über die häufigen, wenig von Median oder Mittelwert abweichenden Werte gute Auskünfte zu haben sind, nicht aber über die extremen, von denen aber gerade der eine Ast für das Problem der Sicherheit entscheidend wichtig ist. Solche Informationen wären nur zu gewinnen, wenn viel grössere Stichproben beobachtet werden könnten; ihre erforderliche Grösse ist etwa umgekehrt proportional zur relativen Häufigkeit jener Abweichungen, über die man Auskunft haben möchte und deren Wahrscheinlichkeit in der gleichen Grössenordnung liegt wie die Häufigkeit der Schadenfälle $W(E')$, die man in Kauf nehmen will. Soll die Sicherheit in der Höhe von $1\text{–}10^{-5}$ bis $1\text{–}10^{-6}$ erreicht werden, so müssen auch Beobachtungen von Stichproben vorliegen, die wenigstens 10^5 bis 10^6 Messwerte umfassen, damit man nämlich über die Häufigkeit so seltener Ereignisse orientiert wäre. Dies ist aber nur mit sehr grossem technischem Aufwand möglich, weshalb wir wohl auf dem Gebiete des Bauwesens vorläufig darauf verzichten müssen.

Gewiss lassen sich mit der Theorie der Extremwertstatistik Hypothesen über die Häufigkeit seltener Ereignisse aufstellen [12, 13]. Dies kann auch auf Grund von Verteilungen geschehen, die aus kleineren Stichproben bestimmt wurden, indem man nämlich nur das Verhalten der extremen Werte daraus betrachtet und durch besondere Extremwertverteilungen annähert. Solche hypothetischen Näherungen sind aber auch nur dann wirklich schlüssig, wenn sie sich auf sehr viel Beobachtungsmaterial stützen können, wie das zum Beispiel für langdauernde Messungen klimatischer Grössen, der Abflussmengen von Flüssen usw. der Fall ist. Ein Vorschlag von Weibull für die Verteilung der extremen Abweichungen bei der Festigkeit von Baumaterialien leitet sich aus elementaren Festigkeitsbetrachtungen her. Er hat die Form [12, 13]:

$$F(\alpha) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{\alpha}{a}\right)^k\right) \qquad k > 0 \tag{61}$$

Darin bedeutet α die Variable (Festigkeitsgrösse), a den erwarteten Extremwert.

Für die meisten Bauten können aber solche Aussagen aus zwei Gründen nicht angewandt werden:

1. Es gibt überall neben den gut bekannten auch noch Parameter, für die keine äquivalenten Auskünfte zur Verfügung stehen, bei denen aber Abweichungen von der gleichen Grössenordnung erwartet werden müssen. Dann hat es keinen grossen Sinn, einen Einfluss mit hoher Genauigkeit einzuführen, wo andere Grössen mit groben Schätzungen vertreten sind.

2. Bei allen Bauten spielen jene Einflüsse, die ausserhalb der «natürlichen» Streuung grosse Abweichungen erzeugen, eine entscheidende Rolle. Es handelt sich dabei wiederum um die «groben» Fehler, über die weiter oben schon gesprochen worden ist. Nach ihrer Auswirkung können sie wohl einzelnen Parametern zugeordnet werden (Überlastung, Konstruktionsfehler, Materialmängel,

Rechenfehler in der Bemessung usw.). Ihre Ursache ist aber ausserhalb des Tragwerkes zu suchen, eben beim ausführenden Personal (Konstrukteur, Bauleiter, Maurer usw.), und ausserdem beim Benützer.

Aus diesen zwei Gründen ist es nicht sinnvoll, noch weiter über einzelne Extremwerte zu sprechen, für die man Auskünfte besitzt; vielmehr wenden wir uns den Konsequenzen zu, die sich daraus ergeben, dass die statistischen Ergebnisse und Überlegungen nicht hinreichen, um für den allgemeinen Fall des üblichen Bauwerks Sicherheitsmargen zu bestimmen.

Es stellen sich zwei Probleme:

1. Gibt es Möglichkeiten, Informationen über die Sicherheit zu bekommen, die den Einfluss der groben Fehler schon in sich schliessen?

2. Wie soll den groben Fehlern begegnet werden, d. h. wie kann man ihre Häufigkeit und Grösse reduzieren, welches sind eventuelle Konsequenzen für die Wahl der Sicherheitsmargen?

Die erste Frage wird im folgenden diskutiert werden. Über die zweite wird weiter unten noch die Rede sein (5.2.15.ff).

Man kann die Bauwerke in ihrer Gesamtheit ebenfalls als Bevölkerung im statistischen Sinne ansehen, die sich beobachten lässt. Ohne auf spezifische Gegebenheiten Rücksicht zu nehmen, findet man bei allen Bauwerken, die bisher bestanden haben oder noch bestehen, eine Qualifikation, die mit der Sicherheit in engem Zusammenhang steht, nämlich die relative Häufigkeit der Versager unter den Tragwerken. Dies ist eine direkte Nachmessung der *Sicherheit an einer sehr grossen Stichprobe*.

Allerdings ist es nicht möglich, daraus genaue Zahlenwerte zu formulieren, weil ja nicht alle Versager gleichviel bedeuten und auch nicht alle für eine Untersuchung greifbar sind. In Form von Schätzungen lässt sich die «allgemeine Erfahrung» aber sehr wohl zusammenfassen.

Demgegenüber wissen wir, nach welchen Methoden und mit welchen Sicherheitsmargen zu jeder Zeit gebaut wurde. Zum Beispiel gilt seit 1951 in der Schweiz der Bruchsicherheitsfaktor von 1,8 für Biegeelemente, die mit hochwertigem Stahl armiert werden. Für die seither erstellten Bauten darf man also annehmen, dass sie nach dieser Vorschrift dimensioniert worden sind. Sie sollen für das Weitere die exemplarische Diskussionsgrundlage bilden.

Der Wert 1,8 ist in der Norm [53] als «minimale Bruchsicherheit» bezeichnet. Hiezu sei nochmals bemerkt, dass die Bezeichnung «-sicherheit» für einen Sicherheitsfaktor oder irgendeinen anderen Vergleichswert der Sicherheit nicht zulässig ist. Rechnet man die nach elastischen Methoden konstruierten Bauten mit dem Traglastverfahren nach, so ergibt sich im Mittel ein etwas höherer Sicherheitsfaktor, nämlich $\bar{S} = 1{,}9$. Dieser Wert soll als Median der Verteilung der «tatsächlichen Sicherheitsfaktoren» von Biegeelementen gelten.

Von dieser Verteilung ist noch ein zweiter Wert zugänglich, nämlich die relative Häufigkeit der Bauten, die aus irgendeinem Grunde versagten. Sie beträgt zwischen 10^{-3} und 10^{-5}. Darin sind alle Fälle von Fahrlässigkeit, Unzuverlässigkeit und sonstigen groben Fehlern eingeschlossen. Genaue Zahlenwerte sind sehr schwierig zu ermitteln, da aus begreiflichen Gründen nicht alle Schadenfälle an die Öffentlichkeit gelangen. Ausserdem müsste man, bevor solche Zahlen formuliert werden, eine Wertung der einzelnen Vorkommnisse vornehmen (es bedeutet nicht das Gleiche, ob eine grössere Brücke oder ein untergeordnetes Tragelement eines Hochhauses zu Schaden kommt). Für spektakuläre, weiträumige Unfälle lässt sich immerhin auf eine Verhältniszahl schliessen, die zwischen den angegebenen Grenzen liegt. Solche folgenschwere Unfälle gelangen im allgemeinen nicht an die Öffentlichkeit.

Aus den statistischen Daten der Bauwerkseigenschaften können wir – zum Beispiel mit Hilfe einer logarithmisch normalen Verteilung als Näherung – eine Verteilungskurve der rein zufälligen Abweichungen für den Sicherheitsfaktor berechnen. Es ist natürlich hypothetisch, gerade diese Verteilung auch für die seltenen zufälligen Abweichungen einzuführen. Nach den Ergebnissen der letzten beiden Abschnitte lässt sich aber diese Hypothese einigermassen stützen.

Benützen wir für die Berechnung des Biegewiderstandes die Formel (35) für das plastische Moment, und setzen wir als geschätzte mittlere Werte die Variationskoeffizienten

$$v_1 = \pm 8\%$$
$$v_2 = \pm 5\%$$
$$v_3 = \pm 5\%$$

so ergibt sich als «zufällige» Bruchwahrscheinlichkeit mit

$$g = 5{,}8$$

der Wert

$$W(E') = W(S \leq 1) = 1{,}3 \cdot 10^{-8} \qquad (62)$$

Dieses Resultat ist natürlich auf Grund der Unschärfe der gemachten Annahmen eine ziemlich rohe Schätzung. Die Wahl der benützten Zahlenwerte soll deshalb noch kurz referiert werden. Für den Variationskoeffizienten der Festigkeit wurde ein mittlerer Wert aus amerikanischen Prüfreihen zur Fliessgrenze von Armierungsstahl gesetzt. Meist ist ja diese Grösse für den Widerstand von Biegeträgern verantwortlich. Für die Masshaltigkeit (Geometrie des Querschnittes, v_2), die stark von den Abmessungen der Glieder abhängt, ist eine Streuung von 5% für grosse Querschnitte sicherlich zu hoch. Für die kleineren Tragglieder, die die Mehrzahl bilden, muss aber speziell für die statische Höhe (Lage der Armierung) mit einer solchen Unsicherheit gerechnet werden. Bei der Schätzung des Variationskoeffizienten der Belastung (v_3) müsste eigentlich eine Extremwertberechnung vorausgehen. Die Normen sind für verschiedene Arten von Belastungen sehr verschieden angesetzt. Zum Beispiel wird bei der Belastung von Wohnhäusern im allgemeinen ein viel zu hoher Wert als Belastungsannahme vorgeschrieben, der in Wirklichkeit nie erreicht wird. Dagegen werden in der Regel bei der Belastung durch Naturkräfte solche Schätzungen für den Extremwert verwendet, die zum Teil aus sehr langen meteorologischen Beobachtungen stammen. Wieder in andern Fällen, wie zum Beispiel bei Lagerhäusern, ist die nominelle Belastung zugleich Lastannahme, ohne dass man speziell darauf Rücksicht nimmt, dass sehr wohl Überbelastungen auftreten können. Der Variationskoeffizient von 5% mag deshalb als stellvertretend für die sehr verschiedenartigen und verschieden grossen Abweichungen der Belastungsannahme stehen.

Im Gegensatz zum Beispiel von Abschnitt *4.2.* wurde in diesem Fall für alle Verteilungen die logarithmisch normale Funktion angesetzt, um die Rechnung zu erleichtern.

Da sich die weitere Diskussion um Grössenordnungen drehen wird, tun jedoch diese zum Teil groben Näherungsannahmen den Schlüssen keinen zu grossen Abbruch, die daraus gezogen werden sollen.

Vergleichen wir nämlich die beiden Werte für die Bruchwahrscheinlichkeit, die aus der allgemeinen Erfahrung ($W[E'] \sim 10^{-3}$ bis 10^{-5}) und aus den zufälligen Abweichungen (10^{-8}) ermittelt wurden, so wird der Unterschied quantitativ sehr deutlich.

Es geschehen also viel mehr Schadenfälle, als aus zufälligen Abweichungen der Bauwerkseigenschaften zu vermuten wäre. Durch dieses Resultat wird die Vermutung von *4.1.* erhärtet, dass fast alle Versager durch direktes Verschulden des Menschen bedingt sind.

Als Konsequenz lässt sich darauf eine weitere Feststellung begründen; sie entspricht im wesentlichen der kurzen Formulierung über die Wirkung der Kontrollen (*4.1.*):

Sicherheitsmargen, die auch gegen grobe Fehler besser schützen würden, müssten unverhältnismässig hoch angesetzt werden. Dies müsste auf einen untragbar grossen wirtschaftlichen Aufwand führen. Somit muss man, statt zu «kompensieren», ein Mittel suchen, durch das man sie möglichst ausschalten kann. Das beste Mittel aber sind wiederum die Kontrollen.

Grobe Fehler sind nach ihrer Art und Weise, nach Grösse und Vorzeichen und nach dem Ort ihres Auftretens fast beliebig. Es ist somit plausibel, dass sie nicht durch einfache, stereotype Massnahmen eliminiert werden können. Die Kontrollen müssen je nach der Art der zu erwartenden Fehler variiert werden: Gegen Fehler bei der statischen Berechnung helfen nur Kontrollrechnungen, die sich aber nicht auf eine blosse Überprüfung der arithmetischen Rechenschritte beschränken dürfen. Es müssen echte, d.h. von der ursprünglichen Rechnung möglichst unabhängige Kontrollen sein. Gegen grobe Fehler in den Abmessungen der Tragglieder hingegen schützen schon ein einfacher Augenschein oder das Nachmessen mit den einfachsten Messmitteln usw.

Als Grundsatz gilt: So mannigfaltig die Möglichkeiten sind, Fehler zu begehen, so vielfältig müssen auch die angewandten Kontrollen sein. Dieser Grundsatz wird allerdings aus technischen Gründen nie voll erfüllt werden können, er muss aber Richtlinie bleiben.

Es muss hier darauf verzichtet werden, über Kontrollmassnahmen ausführlicher zu sprechen, weil dazu die ganze Bautechnik rekapituliert werden müsste und überdies das Wesentlichste an der Kontrolle, die Sorgfalt, immer den Beteiligten selbst überlassen bleibt. Deshalb ist es wohl auch nicht sehr sinnvoll, Kontrollen zu reglementieren, soweit es sich nicht um allgemein notwendige Routinenachweise handelt.

Meist sind die Kontrollmassnahmen nicht schwierig, bedeuten aber in vielen Fällen zusätzliche Kosten und Zeitverlust, die sich erst im ganzen, d.h. bei der gesamthaften Betrachtung aller Bauwerke, lohnen.

4.5. Formulierung der Sicherheitsmargen

Um die praktische Handhabung der Sicherheitsmargen zu erleichtern und sie gleichzeitig möglichst detailliert auf jeden Fall abstimmen zu können, hat man versucht, die Grundform – den einfachen Sicherheitsfaktor – in Anteile aufzuspalten. Diese sollen in verschiedener Weise den einzelnen Grössen der Bemessung (Bauwerkseigenschaften) zugeordnet werden, um deren Unsicherheiten auszugleichen: Einem unsicheren Wert wird eine grössere Sicherheitsmarge zugeordnet als einem, über dessen tatsächliche Grösse man sehr genau Bescheid weiss [70]. Auch andere Erkenntnisse werden darin eingebaut, wie zum Beispiel die verschiedene Bedeutung der Bauten, die sich in den verschieden schweren Folgen eines potentiellen Versagens ausdrückt. So werden etwa für Eisenbahnbrücken aus Stahl höhere Sicherheitsmargen verlangt als für Hochbauten usw. [161].

Studiert man die Variation der Sicherheitsmargen nach solchen Gesichtspunkten, so drängt es sich wegen der Verschiedenartigkeit der einzelnen Argumente auf, statt des einfachen Sicherheitsfaktors ein System von Teilsicherheitsmargen zu bilden, durch deren verschiedene Kombinationsmöglichkeiten die gewünschte Variation erreicht wird.

Offensichtlich sind Belastung und Festigkeit voneinander weitgehend unabhängige Grössen. Auch die Festigkeitseigenschaften verschiedener Baumaterialien werden nicht voneinander beeinflusst, so dass für jede solche Gruppe von Parametern von diesem Gesichtspunkte aus ein besonderer Teilsicherheitsfaktor eingeführt werden dürfte.

In der Folge sollen die hauptsächlichen Möglichkeiten einer Aufteilung des Sicherheitsfaktors kurz durchgenommen werden, wobei vor allem die formalen Argumente zur Sprache kommen sollen. Es würde zu weit führen, alle Möglichkeiten der Anwendung im Detail zu diskutieren.

Da der einfache Sicherheitsfaktor S im weiteren detaillierter behandelt wird, wird er aus der Vergleichsbetrachtung dieses Kapitels als besondere Form der Sicherheitsmarge weggelassen, wo er nicht für Vergleiche der verschiedenen Systeme von Teilfaktoren beigezogen werden muss.

4.5.1. Die Materialfaktoren

Die Baumaterialien haben verschiedene statistische Eigenschaften, wie das bei den unterschiedlichen Stoffen und Herstellungsarten zu erwarten ist. Da die Materialfestigkeit einer der wichtigsten Parameter der Sicherheit ist, hat man, um die zu erwartenden Abweichungen gleich schon «an Ort und Stelle» ihres Auftretens zu kompensieren, besondere Faktoren eingeführt, die die rechnerische Festigkeitsannahme um einen Betrag verringern, der grob der erwarteten extremen Abweichung entspricht: die Materialfaktoren m_i.

Ihre Grösse bestimmte man vorwiegend aus der allgemeinen Erfahrung und vor allem aus älteren Sicherheitsvorschriften (USA, UdSSR [117, 121]). Wo angegeben wird, dass die Materialfaktoren aus statistischen Überlegungen allein bestimmt worden seien, muss dies als mindestens verdächtig bezeichnet werden, weil es, wie wir noch sehen werden, aus formalen Überlegungen nicht möglich ist, zwischen den Gesetzen der Fehlerübertragung und einem System von Materialfaktoren eine Übereinstimmung herzustellen.

Neben den eigentlichen Materialeigenschaften und deren statistischen Belangen werden meist noch andere Bedingungen durch die Materialfaktoren berücksichtigt: Wichtigkeit des betreffenden Bauwerkes, geometrische Unsicherheiten, Belastungsannahme usw. Je nachdem, wieviel den Materialfaktoren zugeordnet wurde, vereinigen sie die ganze Sicherheitsmarge in sich oder nur einen Teilbetrag, der durch andere Beiwerte, zum Beispiel die Lastfaktoren, ergänzt werden muss.

Dies bedeutet eine erste Schwierigkeit: Die Materialfaktoren müssen Einflüsse berücksichtigen, die ihrer Funktion nicht entsprechen. Ihre Bestimmung und wohl auch ihre Gliederung wird damit sehr kompliziert. Handelt es sich allerdings um den Fall eines Tragwerks aus einem einzigen Material, so wird die Verwendung von Materialfaktoren formal wieder derjenigen des einfachen Sicherheitsfaktors gleich, und der Nachteil wirkt sich nicht aus. Beim Stahlbeton, wo stets zwei grundverschiedene Baustoffe beteiligt sind, ist dies weniger einfach. Diesem Fall soll deshalb eine kurze formale Untersuchung gewidmet sein.

Der Einfachheit halber nehmen wir an, dass die Fliesspannung (σ_F) des Stahles und die Druckfestigkeit (β_D) des Betons die einzigen Parameter seien, die wesentliche Abweichungen haben können. Auch die Belastungsannahme soll so genau sein, dass Fehler von dort her nicht ins Gewicht fallen.

Für die formale Untersuchung benützen wir ein Beispiel: Es soll der Widerstand eines zentrisch gedrückten Querschnitts ermittelt werden. Er beträgt nominell:

$$T = T_{Beton} + T_{Stahl} = F_B \cdot \overline{\beta} + F_S \cdot \overline{\sigma}_F \qquad (63)$$

Der Variationskoeffizient der Traglast, der zugleich derjenige des Sicherheitsfaktors ist, berechnet sich nach dem «Fehlerfortpflanzungsgesetz»:

$$\begin{aligned} v_s &= \frac{1}{\overline{T}} \cdot \sqrt{\left(\frac{\delta T}{d\beta} \cdot v_\beta \cdot \beta\right)^2 + \left(\frac{\delta T}{d\sigma_F} \cdot v_\sigma \cdot \delta_F\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{T_{Beton}}{\overline{T}} \cdot v_\beta\right)^2 + \left(\frac{T_{Stahl}}{\overline{T}} \cdot v_\sigma\right)^2} \qquad (64) \\ &= \sqrt{(\varkappa_B v_B)^2 + (\varkappa_S v_S)^2} \end{aligned}$$

Ist die Sicherheit $W(S>l)$ mit der Kennzahl g vorgeschrieben, so kann der erforderliche Sicherheitsfaktor ermittelt werden:

$$\overline{S} = \frac{1}{1 - g \cdot v_S} \qquad (65)$$

(Wir benützen hier die einfache Normalverteilung als Grundlage. Für die logarithmisch-normale Verteilung ergibt sich der gleiche formale Schluss, der aber in diesem Fall weniger übersichtlich dargestellt werden könnte.)

Anderseits ist:

$$\overline{S} = \frac{\overline{T}}{m_B \cdot \overline{T}_{Beton} + m_S \cdot \overline{T}_{Stahl}} \qquad (66)$$

und wir erhalten durch Einsetzen der ersten in die zweite Gleichung die folgende Formel:

$$1 = \frac{1 - g \cdot \sqrt{(\varkappa_S v_S)^2 + (\varkappa_B v_B)^2}}{m_B \varkappa_B + m_S \varkappa_S} \qquad (67)$$

Dies ist eine Funktionalgleichung für die Materialfaktoren m_B und m_S, wenn wir noch die folgenden Nebenbedingungen stellen, die aus plausiblen Gründen erfüllt sein müssen:

Die Materialfaktoren dürfen nicht von den Querschnittswerten ($\varkappa_i$) abhängen:

$$\frac{dm_B}{d\varkappa_B} = \frac{dm_S}{d\varkappa_B} = \frac{dm_B}{d\varkappa_S} = \frac{dm_S}{d\varkappa_S} = 0 \qquad (68)$$

Ausserdem dürfen sie auch nicht gegenseitig abhängig sein:

$$\frac{dm_B}{\partial m_S} = 0; \frac{dm_S}{\partial m_B} = 0 \qquad (69)$$

Damit ist eine Lösung der Funktionalgleichung (67) unmöglich, wie sich durch Umformen leicht zeigen lässt. Das bedeutet, dass kein System von Materialfaktoren gefunden werden kann, das auf die Unsicherheiten bei der Festigkeit der beiden Materialien «gerecht» Rücksicht nimmt. Es gibt keine Beziehung einfacher Art zwischen den Materialfaktoren und den Streumassen additiv verbundener Grössen; Materialfaktoren sind also in diesem Fall formal nicht richtig.

Praktische Erfahrungen mit verschiedenen Baunormen haben aber gezeigt, dass die approximative Verwendung von Materialfaktoren für die üblichen Fälle weder zu allzu grossen Risiken noch auf übermässigen Aufwand führt [223]. Das lässt sich damit erklären, dass sich die Funktionalgleichung, deren Form ohnedies von der Wahl der einzelnen Verteilungen abhängt, gut genug durch treppenartiges Abstufen der Sicherheitsbeiwerte (hier Materialfaktoren) annähern lässt. Somit muss man ein System von Materialfaktoren nicht ohne weiteres ausschliessen. Es muss aber betont werden, dass sich bei einer solchen Approximation die Sicherheitsbeiwerte nicht mehr aus den statistischen Belangen der Baumaterialien herleiten lassen, sondern das Produkt eines praktischen Ausgleichungsprozesses sind; das bedeutet, dass ein System von Material- (oder sonstigen Teilfaktoren) wiederum nach der allgemeinen Erfahrung und damit einigermassen nach der Willkür der Beteiligten entworfen werden muss.

Dies wirkt sich auch auf die Möglichkeit einer Rekonstruktion der wirklichen Sicherheit aus den Sicherheitsbeiwerten aus. Eine solche ist nicht direkt möglich, sondern es muss ein besonderer Sicherheitsnachweis dafür neu angesetzt werden.

4.5.2. Die Lastfaktoren

Grundsätzlich bedeutet es das gleiche, ob die Sicherheitsmargen bei der Bemessung an der Tragfähigkeit (Materialfaktoren) oder an der Belastungsannahme (Lastfaktoren) angebracht werden. Verwendet man nur Materialfaktoren, so lässt sich dagegen einwenden, dass damit keine Rücksichtnahme auf die Art der Belastungsannahme und deren Unsicherheiten möglich ist. Das Umgekehrte gilt für die Lastfaktoren.

Im allgemeinen wird gelten:

$$m_i \leq 1 \tag{70}$$

und für die Lastfaktoren:

$$\lambda_i \geq 1 \tag{71}$$

Darüber hinaus gibt es nichts, was die Lastfaktoren grundsätzlich von den Materialfaktoren unterscheidet. Formal liesse sich (etwa für den Fall, dass die Belastung eine Summe aus verschiedenen Anteilen verschiedener Genauigkeit sei) auch für die Lastfaktoren herleiten, dass sie, wie die Materialfaktoren, nicht mit dem Fehlerfortpflanzungsgesetz in Übereinstimmung gebracht werden können. Somit kann man auch aus den Lastfaktoren im allgemeinen Fall nicht mehr auf die wirkliche Sicherheit des damit versehenen Tragwerks schliessen. Das wiegt aber nicht schwer, da wir vorläufig aus Mangel an Informationen überhaupt darauf verzichten müssen, den Zusammenhang zwischen Sicherheit und Sicherheitsbeiwerten quantitativ herzustellen.

Material- und Lastfaktoren lassen sich auch kombiniert verwenden [54, 55]. Man kann so die statistischen Belange beider Teile der Sicherheitsungleichung (T und P) getrennt berücksichtigen, wobei die gleichen formalen Einwände gelten wie bei den Material- und Lastfaktoren.

Von den Lastfaktoren wird noch einmal im Zusammenhang mit einem speziellen Problem die Rede sein (Anhang *8.2.*).

4.5.3. Die zulässigen Spannungen

Die Methode der zulässigen Spannungen hat die Elastizitätstheorie zur Voraussetzung. Soweit Belastung, Beanspruchung und Verformung zueinander proportional sind, entsprechen die zulässigen Spannungen ungefähr einem System von Materialfaktoren. Sie sind somit aus den gleichen Gründen formal nicht einwandfrei. Ausserdem sind sie für Untersuchungen ausserhalb des Gültigkeitsbereiches der Elastizitätstheorie nicht brauchbar und müssen für diesen Fall durch andere Systeme von Sicherheitsbeiwerten ersetzt werden. Wendet man für die Bemessung zulässige Spannungen an, so bedeutet dies die Bemessung nach einem Verformungskriterium, was in vielen Fällen nicht sinnvoll ist. Es interessiert nicht, wann das Tragwerk gewisse – sehr kleine – Deformationen erleidet, sondern im allgemeinen ist wesentlich, welche Belastung es überhaupt noch aushält (Bruchkriterium, *3.3.*).

Ein anderes Argument spricht ebenfalls gegen die Anwendung der zulässigen Spannungen: Man kann in der Berechnung nicht die gemessenen Festigkeitswerte verwenden, sondern hat sich an gewisse genormte Klassen von Baumaterialien zu halten, die vielleicht nicht zeitgemäss sind: Zum Beispiel werden in den SIA-Normen zwei Sorten Armierungsstahl durch die zulässigen Spannungen unterschieden, wobei nur auf die jeweilige Fliessgrenze Rücksicht genommen wird, nicht aber darauf, ob sich die Stahlsorten durch gleichmässige Festigkeit auszeichnen oder nicht, wie das dem Sicherheitsbegriff entsprechen würde. Wollte man die zulässigen Spannungen auch noch darauf abstimmen, so würde ihre Handhabung äusserst kompliziert.

Trotzdem können wir vorläufig auf den Gebrauch der zulässigen Spannungen als Sicherheitsbeiwerte nicht verzichten: Sie sind die hergebrachte Form der Sicherheitsmargen, die in den letzten Jahrzehnten für die meisten Bemessungen angewandt wurde. Die Praxis ist auf ihren Gebrauch eingespielt. Zudem wird die elastische Theorie für viele Probleme der Statik und Dimensionierung weiterhin die Grundlage sein müssen, weil andere, allgemeinere Methoden noch nicht genügend genau erforscht sind, um in allen Fällen eine Bemessung nach dem Bruchkriterium zuzulassen. Weiter gilt es zu bedenken, dass der Wechsel von zulässigen Spannungen auf andere Formen von Sicherheitsmargen eine grosse Umstellung bedeutet, der sich alle Konstrukteure zu unterziehen haben, bevor man neue Methoden allgemein einführen kann.

Die Konsequenz ist, dass wohl noch für einige Zeit die Methode der zulässigen Spannungen als gebrauchsfähiges Instrument weiter gepflegt werden muss – neben anderen, neueren Möglichkeiten, die sich mit der Zeit entwickeln können.

4.5.4. Schlussfolgerungen

Aus der Diskussion der verschiedenen Möglichkeiten, den Sicherheitsfaktor in Anteile aufzuspalten, geht hervor, dass dies immer Nachteile, mindestens formaler Art, zur Folge hat.

Es gibt also kein anderes System von Sicherheitsbeiwerten, ausser dem einfachen Sicherheitsfaktor, durch das die Sicherheitsmarge streng richtig nach der jeweiligen Fehlerverteilung abgemessen werden kann. (Diese Behauptung ist nicht so allgemein bewiesen worden, man könnte dies aber für jede beliebige Aufspaltung des Sicherheitsfaktors in multiplikative oder additive Teilfaktoren tun, wie es im Fall der Materialfaktoren durchgeführt wurde. Der Satz gilt nicht für die Sicherheitszone Z (15), die sich ohne Aufspaltung aus dem Sicherheitsfaktor ableiten lässt.)

Das formale Kriterium ist allerdings nur von theoretischem Wert, solange sich die Sicherheitsmargen ohnehin nicht auf statistische Grössen allein begründen lassen. Sobald man nämlich die Arbeitshypothese von *4.2.* fallen lässt, kann es nicht mehr darum gehen, ein «richtiges», sondern ein möglichst gutes System von Sicherheitsbeiwerten zu bilden.

Hierzu sind noch andere, vor allem methodische Gesichtspunkte heranzuziehen. Wie in Abschnitt *8.2.* gezeigt werden wird, gibt es Probleme, die sich mit dem einen System (Lastfaktoren) besser lösen lassen als mit anderern. Dagegen gibt zum Beispiel die Lösung des einfachen Sicherheitsfaktors den Vorteil der grösseren Übersichtlichkeit und der leichteren Handhabung, speziell für die plastischen Methoden der Bemessung. Deshalb soll das Problem anhand des einfachen Sicherheitsfaktors weiterbehandelt werden, nämlich bis zur zahlenmässigen Anwendung eines vorgeschlagenen Systems an zwei typischen Bemessungsbeispielen (*6.1.; 6.2.*).

5. Die Variation der Sicherheitsfaktoren

5.1. Bedingungen

Damit ein brauchbares System von Sicherheitsfaktoren entworfen werden kann, müssen zuerst noch einige methodische Aspekte und praktische Bedingungen studiert werden, auf welche Weise ein solches System zu entwikkeln ist.

Die erste und wichtigste Bedingung ist die Forderung nach Einfachheit. Sie lässt sich wie folgt spezifizieren: Das Einführen der Sicherheitsmargen in die Bemessung soll diese nicht wesentlich erschweren.

Eine zweite, mehr grundsätzlich-theoretische Regel heisst: Aus der Verwendung der Sicherheitsmargen sollen sich keine zusätzlichen Fehler ergeben, die an den Resultaten merkliche Abweichungen zur Folge haben. Das heisst vor allem, dass die wahre Gestalt der statischen Probleme durch die Sicherheitsmargen nicht verstümmelt werden darf, wie das bei ungeschickter Anwendung von Materialfaktoren oder zulässigen Spannungen leicht geschehen kann.

Die dritte und wegweisende Forderung an die Sicherheitsbeiwerte ist, dass diese allen Einflüssen durch eine entsprechende Variation gerecht werden müssen, die auf die verfügbare oder erforderliche Sicherheit einwirken. Als Beispiel für einen Einfluss, der die verfügbare Sicherheit mitbestimmt, sei die Materialfestigkeit genannt, als Beispiel für einen Parameter der erforderlichen Sicherheit etwa die Anzahl Menschen oder der Wert der Güter, die bei einem potentiellen Einsturz eines Tragwerks in Gefahr kämen.

Diesen drei hauptsächlichsten Bedingungen zu genügen, ist Zweck eines Systems von Sicherheitsmargen. Sie widersprechen sich zum Teil, so dass eine Lösung wiederum nicht richtig, sondern höchstens möglichst gut sein kann, wie es schon für die rein formale Seite des Problems in Kauf genommen werden musste.

5.2. Zusammenstellung der Grundvariablen

Der folgende Vorschlag für die Auswahl der Variablen, die zur zahlenmässigen Bestimmung des Sicherheitsfaktors bedeutsam sind, ist nicht die einzige Möglichkeit. Nicht alle speziellen Probleme können auf einfache Weise darin eingebaut werden. Deshalb mag die Zusammenstellung als vereinfachtes Rezept verstanden sein, «wie es gemacht werden könnte».

Da die Sicherheit gegen Bruch meist bedeutsamer ist als der Schutz gegen andere Schäden (Deformationen, Risse usw.), wird stillschweigend angenommen, dass überall dieses Kriterium der Zusammenstellung zugrunde gelegt sei. Nach den Bemerkungen von *5.1.* unterscheiden wir zwei Gruppen von Variablen:

- *5.2.1.* Quellen von Fehlern und Abweichungen sowie angewandte Kontrollmassnahmen, die über die tatsächliche Sicherheit (am fertigen Tragwerk) entscheiden.
- *5.2.2.* Massnahmen für die erforderliche Sicherheit.

5.2.1. Variable der tatsächlichen Sicherheit

5.2.11. Unsicherheit bei den Materialeigenschaften

Beim Stahlbeton wirken stets zwei Baustoffe zusammen, die sowohl statistisch wie statisch sehr verschiedene Eigenschaften haben. Für Stahl setzt man in der Regel die Fliesspannung, für Beton die erwartete Druckfestigkeit als repräsentative Grössen in die Rechnung ein.

Nicht immer sind die beiden Materialien entsprechend ihren Querschnittsanteilen an der Tragfähigkeit beteiligt: Zum Beispiel rechnet man bei reiner Biegung schwach armierter Querschnitte ($\mu > \mu_{Gr}$) fast nur mit dem Widerstand der Zugarmierung, weil diese darüber entscheidet, welche Beanspruchung der Querschnitt übertragen kann [33]. Umgekehrt muss für schwer armierte Querschnitte ($\mu > \mu_{Gr}$) vor allem die Festigkeit der Druckzone aus Beton nachgewiesen werden. Zur Illustration sei auf die Beispiele von *6.2.* und *6.1.* verwiesen. Das letztere handelt allerdings von einem gedrückten Querschnitt, der sich aber in dieser Eigenschaft gleich verhält wie der stark armierte Biegequerschnitt.

Je nachdem, welches Material hauptsächlich über die Tragfähigkeit entscheidet, muss mit verschieden grossen Sicherheitsmargen gerechnet werden; für Ortsbeton zum Beispiel sind die bedeutend grösser als für Armierungsstahl, der einem Fabrikationsprozess entstammt. Ausserdem muss beim Beton noch mit einer grösseren Häufigkeit der groben Fehler gerechnet werden, da er durch weniger geschultes Personal mit weniger eingespielten Methoden hergestellt und gepflegt wird. Dies ist auch auf die Sicherheitsmargen von grossem Einfluss.

5.2.12. Ungenauigkeit der Abmessungen

Die Geometrie der Querschnitte, insbesondere die statische Höhe *h* (Lage der Armierung) und die äusseren Masse sind nach den Formeln für die Querschnittswiderstände ebenfalls von direktem Einfluss auf die Tragfähigkeit. Verschiedene Konstruktionen und verschiedene Arten der Herstellung bewirken, dass die Querschnitte nicht alle im selben Masse anfällig sind für solche Massfehler.

Bei Bauten aus Ortsbeton treten grössere Abweichungen auf als bei vorfabrizierten Elementen (*8.1.*). Bei kleinen Abmessungen fallen die Fehler beim Schalen und beim Verlegen der Armierung stärker ins Gewicht als bei sehr massigen Tragwerken. Für Ortsbeton sind gewöhnlich Massfehler von wenigen Zentimetern zu erwarten. Im Variationskoeffizienten werden sie aber ins Verhältnis zu den Abmessungen selbst gesetzt, woraus sich ergibt, dass für schlanke Glieder eine Abweichung von ein bis zwei Zentimetern schon eine bedeutende Abnahme der tatsächlichen Tragfähigkeit zur Folge haben kann, wogegen sich der gleiche Fehler bei sehr hohen Trägern kaum merkbar auswirkt.

Dies ist zum Beispiel in SIA-Norm 162 berücksichtigt, indem für schlanke Glieder niedrigere zulässige Spannungen vorgeschrieben wurden als für schwere Elemente. (Die Unterscheidung ist zwar wohl eher im Hinblick auf die Durchbiegungen und Rissweiten gedacht, müsste aber für eine Berücksichtigung der Massfehler ähnlich lauten.)

Die Massungenauigkeiten sind bisher in statistischen Untersuchungen meist beiseite gelassen worden, vermutlich mit dem Gedanken, dass sie den groben Fehlern zuzuzählen seien. Gewiss gibt es Abweichungen, die man auf falsche Konstruktion des Lehrgerüstes oder der Unterstützungen zurückführen muss usw. Streuungen von wenigen Zentimetern werden sich nie ganz vermeiden lassen: Man denke etwa an die obenliegende Armierung, die nach der Montage oft durch das Einbringen und Verteilen des Betons aus ihrer richtigen Lage gedrückt wird. Hinzu treten Ungenauigkeiten der Pläne, Senkungen der Schalung, nachträglich angebrachte Aussparungen usw.

Von grosser grundsätzlicher Bedeutung ist ferner, dass sich speziell die Lage der Armierung nach dem Einbringen des Betons nicht mehr korrigieren lässt, da sie nur mehr schwierig beobachtet und kontrolliert werden kann. Deshalb besitzen wir auch keine statistischen Informationen über diese Grösse und sind für deren Einführung auf blosse Schätzungen angewiesen.

5.2.13. Unsicherheit bei der Belastungsannahme

Es ist im allgemeinen üblich, für die Belastungsannahme Maximalwerte abzuschätzen und diese in die Rechnung einzuführen, weil in den meisten Fällen die höchste Belastung für das Schicksal des Bauwerks entscheidend ist. Abweichungen von den Rechenannahmen gehorchen also einer Extremwertverteilung und können – wo statistische Überlegungen überhaupt sinnvoll sind, gleich behandelt werden wie die Materialeigenschaften.

Bei Lasten, die direkt durch den Menschen aufgebracht werden, sind vielfältige Möglichkeiten der Überlastung zu erwarten. Die Belastungen werden zur Zeit des Gebrauchszustandes aufgebracht, und so müssen sich die Kontrollen gegen Überlastung vor allem auf diesen Zeitraum erstrecken, sollen sie wirksam sein.

Über Fälle, wo nicht die maximale, für alle Lastarten gleichgerichtete Beanspruchung über die Tragfähigkeit und Standfestigkeit entscheidet, wird noch zu sprechen sein (*8.2.*).

5.2.14. Bemessungs- und Berechnungsmethoden

Grundsätzlich sind alle baustatischen Methoden Näherungen. Bei den üblichen Fällen sind aber die Fehler, die man durch vereinfachende Annahmen über das mechanische Verhalten begeht (z.B. «elastisch – ideal plastisch»), so klein, dass sie gegen die Varianz der anderen Parameter nicht ins Gewicht fallen.

Da aber die mechanischen und baustatischen Methoden nicht immer hinreichen, um die Probleme der Baustatik in diesem Rahmen richtig zu lösen, behilft man sich oft mit noch gröberen Näherungen und Vereinfachungen (z.B. bei der Berechnung mehrdimensionaler Tragelemente wie Platten, Schalen usw.). Dies geschieht vielfach auch dort, wo eine genaue Methode bekannt wäre, aber nur mit einem unverhältnismässig grossen Rechenaufwand durchgeführt werden könnte.

Soweit es möglich ist, untersucht man zusätzlich, ob die genäherten Resultate «auf der sicheren Seite liegen», d.h., ob man die Sicherheit, die sich aus den Resultaten rechnet, nicht überschätze. In vielen Fällen ist aber auch dies nicht mehr möglich. Dann muss man das Vorhandensein von Fehlern in Kauf nehmen, über deren Grösse und Vorzeichen man nicht orientiert ist.

Manchmal lassen sich solche Fehler eingabeln, indem man Spezialfälle einfacherer Art oder Versuchsstücke nachprüft. Somit entziehen sich schliesslich nur jene Fälle einer zuverlässigen Beurteilung, wo mit gänzlich neuen Baumaterialien, Konstruktionen, Methoden gearbeitet wird.

Dazu gehören in einem gewissen Sinne die Modellversuche, die nach unkontrollierbaren Analogien Resultate ergeben können, die sich durch grosse Ungenauigkeit und grosse systematische Abweichungen auszeichnen. Vor allem quantitative Schlüsse aus Modellversuchen zu ziehen, muss als gefährlich bezeichnet werden, weil diese oft gar nicht nachgeprüft werden können.

Zu den Fällen, die mit groben Näherungen berechnet werden müssen, gehören auch gewisse Fälle von kombinierter Beanspruchung im Bruchbereich (Schub und Torsion mit Biegung), die noch nicht genügend erforscht sind. Man behilft sich in diesen Fällen mit empirischen Formeln, die man den Resultaten von Versuchen angepasst hat. Ihre Anwendung wird aber um so unsicherer, je weiter sich die Bedingungen des spezifischen Anwendungsfalles von denjenigen des Versuches entfernen.

Fehler, die aus der Anwendung von Näherungsmethoden herrühren, kann man nicht als zufällig betrachten; vielmehr handelt es sich um eine Art «grober» Fehler, die man aber trotzdem manchmal nicht vermeiden kann. Wir wissen viel zu wenig über sie, als dass man eine Variation von Sicherheitsmargen auf sie stützen könnte. Die einzige Regel, die man zur Vermeidung gefährlicher Auswirkungen geben kann, ist eine rein praktische: Wo unkontrollierte Näherungen verwendet werden müssen, versuche man, durch andere Näherungen die Resultate zu überprüfen.

5.2.15. Verlässlichkeit der Kontrollen

Die Massgabe, die man aus der Verlässlichkeit der Kontrollen für die Höhe der Sicherheitsmargen herleiten könnte, ist von ganz anderer Art, als es die vier vorangegangenen waren. Sie lässt sich nicht durch ein Fehlermass beschreiben. Formal gilt nur, dass die Kontrollen die Häufigkeit der grossen Abweichungen vermindern. Jede Kontrolle besteht in einer Beobachtung eines Gegenstandes auf grobe Fehler. Werden solche bei der Kontrolle bemerkt, so können sie meist auf ihre Schädlichkeit geprüft und bei Bedarf korrigiert werden. Somit werden durch jede angewandte Kontrollmassnahme die Möglichkeiten für grobe Fehler vermindert.

Wenn es darum geht, die Wirkung der Kontrollen ebenfalls als Parameter für die Variation der Sicherheitsmargen zu verwenden, so stellen sich einige Fragen, vorerst über das «wie», nämlich wie Kontrollen anzuwenden sind, damit die grösste Wirkung bei der Elimination der grossen Abweichungen erzielt werden kann.

Schematisch kann man die mannigfaltigen Möglichkeiten für betragsmässig bedeutende Abweichungen und Fehler durch eine Reihe von Teilwahrscheinlichkeiten darstellen, deren Summe man ungefähr kennt (die «Oder-Wahrscheinlichkeit gilt natürlich nur unter der Voraussetzung, dass die verschiedenen Teilwahrscheinlichkeiten zu unabhängigen Ereignissen gehören, was aber in diesem Fall vernünftigerweise anzunehmen ist). Es ist nämlich:

$$\sum_1^n W_i \cong W(E') \tag{72}$$

wobei mit $W(E')$ hier die Häufigkeit von Versagern bei der Gesamtheit der Bauten gemeint ist, die nach (*4.4.*) in der Grössenordnung von 10^{-3} bis 10^{-5} zu suchen ist.

Durch Kontrollen und ihre Konsequenz, die Verbesserungen, sollen nun eine möglichst grosse Anzahl von Teilwahrscheinlichkeiten ausgeschaltet werden. Die gesamte Fehlerwahrscheinlichkeit wird dann um den Anteil

$$\sum_1^m W_i = \Delta W(E') = k \cdot W(E') \tag{73}$$

vermindert. Sind alle W_i gleich gross, so kann man vereinfachen:

$$k\% = \frac{n-m}{n} \cdot 100 \tag{74}$$

wobei k die Reduktion angibt. Soll nun k möglichst gross werden, so ergibt sich daraus für den allgemeinen Fall, dass möglichst die gefährlichsten – grössten – Teilwahrscheinlichkeiten zu verfolgen sind, und zwar möglichst viele. Dies klingt zwar banal, hat aber gewisse Konsequenzen, die nicht selbstverständlich sind: Es ist also nicht sinnvoll, einen Parameter wie etwa die Betonfestigkeit oder die Masshaltigkeit der Schalung mit grossem Aufwand nachzuprüfen und auszukorrigieren, wenn daneben andere Fehlerquellen wie Belastung, Verhalten des Untergrundes usw. ausser Acht gelassen werden. Eine möglichst sinnvolle Verteilung des Kontrollaufwandes gibt die besten Resultate.

Eine weitere grundsätzliche Frage lautet:

Sollen die Sicherheitsmargen überhaupt nach der Wirksamkeit der angewandten Kontrollen variiert werden? Dies würde voraussetzen, dass die Kontrollen einem reproduzierbaren Reglement zu folgen hätten, was nach dem oben Gesagten auf grosse Schwierigkeiten stösst.

Trotzdem ist es schon in einigen Fällen üblich (z.B. dänische Stahlbetonnormen 1939). Dies ist dort möglich, wo Organe von Staates wegen dafür eingesetzt sind, Kontrollen gleichmässig zu handhaben. Wie diese z.B. in unserem Lande zu organisieren wären, kann hier nicht erörtert werden.

Ein gewichtiges Argument, das gegen eine derartige Prämiierung der Kontrollmassnahmen spricht, ist, dass sich diese selbst sehr schwer kontrollieren lassen, und dass dadurch die Verantwortlichkeit unklar werden müsste. Ferner würde es eine Legalisierung eines untragbaren Zustandes bedeuten, nämlich, dass es freigestellt wäre, schlecht oder gut kontrollierte Bauten zu erstellen: Grobe Fehler können beliebige Auswirkungen haben. Schaltet man sie nicht nach Möglichkeit aus, so schützen auch grössere Sicherheitsmargen nicht dagegen.

Ein anderes Argument spricht wieder für die Variation der Sicherheitsmargen nach der Zuverlässigkeit der Kontrollen: Durch den kleineren Materialaufwand, der durch die niedrigeren Sicherheitsmargen gut kontrollierter Bauten notwendig würde, müssten sich Kontrollen sichtbar und unmittelbar lohnen. Dies hätte eine erzieherische Wirkung. Da Kontrollen auch auf die – nach unserer Definition – zufälligen Ereignisse einen günstigen Einfluss haben, wäre ausserdem auch hier etwas zu gewinnen.

Die Diskussion und das Abwägen des Für und Wider zu diesem Punkt führt ins Gebiet der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften hinein und kann darum nicht hier weiter erörtert werden. Für die Variation des Sicherheitsfaktors im vorliegenden Beispiel wird die «Prämiierung» der Kontrollen nicht berücksichtigt.

5.2.2. Variable der erforderlichen Sicherheit

5.2.21. Die Art der Beanspruchung

Das Versagen eines Querschnittes vollzieht sich je nach dessen Struktur und nach der Beanspruchung, die auf ihn wirkt, verschieden. Man unterscheidet die Idealfälle des «spröden» und des «plastischen» Versagens und dementsprechend «spröde» und «plastische» Querschnitte. Dies ist insofern nicht korrekt, als der gleiche Querschnitt unter verschiedenen Kräften verschieden reagieren kann. Es muss also in jedem Fall die Art der Beanspruchung spezifiziert werden.

Beim spröden Bruch wird die Kraftübertragung plötzlich, ohne grosse, vorher schon sichtbare Verformungen unterbrochen, d.h. das Tragwerk hört an dieser Stelle auf, kontinuierlich zu sein. Der Grad der statischen Unbestimmtheit wird dadurch meist um sechs (räumliches Problem) oder drei (ebenes Problem) verringert, was oft zu einem lokalen Einsturz führen muss. Das plastische Versagen lässt sich etwa wie folgt beschreiben: Nachdem die Beanspruchung (Belastung) bis auf einen gewissen Wert – z.B. bis zum plastischen Moment – gestiegen ist, beginnen die Verformungen ohne weitere Laststeigerung rasch zu wachsen. Erst nachdem die Deformationen ebenfalls auf einen gewissen, meist deutlich sichtbaren, Wert gestiegen sind, erfolgt der eigentliche

Bruch, der dann meist ebenfalls spröde ausfällt. Der Grad der statischen Unbestimmtheit wird durch eine plastifizierte Stelle (z.B. «plastisches Gelenk») nur um eins vermindert (*3.5.*). Das bedeutet nur bei statisch bestimmten Systemen die Erschöpfung des Tragwerks.

Plastisches Versagen kommt bei allen Querschnitten vor, die unter reiner Biegung, exzentrischem Zug und Druck nicht aus strukturellen Gründen (zu starke Armierung oder keine Armierung) spröde reagieren.

Wiederum ist hier entscheidend, welches Material schliesslich zuerst «nachgibt». Ist es der Stahl, so entsteht in der Regel ein plastischer Bruch; ist es der Beton, erfolgt ein sprödes, plötzliches Versagen.

Die Konsequenz dieses Unterschiedes ist einleuchtend: Es gibt Fälle, wo der Zusammenbruch plötzlich, ohne grössere Verformungen, die – im Sinne einer Warnung – schon vorher sichtbar gewesen wären, erfolgt. Daneben gibt es Systeme, die eine nahende Erschöpfung durch grosse Ausbiegungen anzeigen.

Man kann daraus auf den Ablauf eines potentiellen Unfalles schliessen, und es ist plausibel, dass dessen Folgen verschieden gefährlich sind, je nach dem, mit welcher Art des Versagens man es zu tun hat. Dies kann durch die Variation der Sicherheitsmargen in Rechnung gestellt werden.

5.2.22. Schaltung der Tragglieder

Ähnlich wie für den Querschnitt und das einzelne Tragglied im kleinen, so kann man auch für ein ganzes Tragwerk den Ablauf eines möglichen Unfalles erörtern. Dafür ist die «Schaltung» des Tragwerkes entscheidend. Im statisch bestimmten System, das einer reinen Serieschaltung entspricht, bedeutet das Ausfallen einer einzigen Kraftübertragung schon, dass das Tragwerk erschöpft ist. Eine kleine Lasterhöhung führt dann zum Zusammenbruch. Bei statisch unbestimmten, d.h. strekkenweise parallel geschalteten Tragwerken gibt es stets mehrere Möglichkeiten, auf welche Weise das System unter einer gegebenen Belastung versagen könnte: Es gibt verschiedene Bruchmechanismen. Für die Illustration dieses Arguments sei auf Beispiel *6.2.* verwiesen.

Es lässt sich nun wesentlich unterscheiden zwischen lokalen, d.h. örtlich begrenzten Einstürzen und dem gänzlichen Zusammenbruch. Man wird «grossräumige Bruchmechanismen» durch entsprechend höhere Sicherheitsmargen ausschalten, ja es wäre sogar denkbar, dass man einen – möglichst ungefährlichen – lokalen Bruch durch niedrige Sicherheitsmargen absichtlich provoziert. Man möchte, dass das Tragwerk an einer Stelle, die man kennt und speziell beobachten kann, zu «versagen» beginnt. Dies entspricht dem Sinne nach der Sicherung von elektrischen Netzen, und es soll vor einem sehr folgenschweren, weiträumigen Zusammenbruch schützen.

Unter einer solchen Sicherung muss man nicht unbedingt den «Bruch» des Sicherungsgliedes verstehen, sondern es können auch andere Veränderungen wie Risse, Einsenkungen kleinen Ausmasses dafür eingesetzt werden. In diesem Sinne ist auch der Grundsatz der elastischen Bemessung zu verstehen: Man schützt sich gegen grosse Verformungen und damit auch gegen das, was nachher käme, nämlich Schaden und Zusammenbruch. Nur gibt der elastische Sicherheitsnachweis keine Auskunft darüber, wie und bei welcher Erhöhung der Lasten der Einsturz einsetzen würde – man weiss also nicht, «wie weit man noch davon entfernt ist», wenn die kritische Verformung erreicht ist.

Die Konsequenz aus den Schaltungseigenschaften der Tragwerke sind die «inneren Folgen» eines potentiellen Versagens, d.h. die Folgen für das Tragwerk selbst. Die Fragestellung für die Variation heisst dann: Gegen welche Möglichkeiten (Mechanismen) des Zusammenbruches hat man sich besonders – durch höhere Sicherheitsmargen – zu schützen?

5.2.23. Das Tragwerk und seine Umgebung

Jedes Bauwerk schliesst eine Gefahr für seinen Inhalt und seine Umgebung in sich ein. Diese müssen somit auch in eine Sicherheitsbetrachtung einbezogen werden.

Es besteht dabei ein grundsätzlicher Unterschied zwischen rein wirtschaftlichen Werten, die etwa durch die Kosten der Wiederbeschaffung zu repräsentieren sind – und menschlichem Leib und Leben.

Das Risiko, das man durch das Einlagern von Gütern in einem Lagerhaus eingeht, kann etwa dem Kostenaufwand gegenübergestellt werden, den man zu einer Erhöhung der Sicherheitsmargen in Kauf nehmen müsste. Daraus lässt sich ein im wirtschaftlichen Sinne «optimaler» Wert der Sicherheitsmarge errechnen, der aber im allgemeinen vom menschlichen Gesichtspunkt aus untragbar klein wird. Materielle Werte können also nicht allein als massgebend für die Bestimmung der Höhe der Sicherheitsmargen herangezogen werden.

Menschenleben und die Gefahr, die ihnen droht, lassen sich hingegen nicht einfach durch materielle Wertmasstäbe ausdrücken. (Obgleich dies in gewissem Sinne im Versicherungswesen gemacht wird, möchten wir hier davon absehen, weil das Festlegen eines solchen Masstabes nicht auf technischen Überlegungen fussen kann.) Gleichwohl ist es sinnvoll, Bauten, die stets von vielen Menschen besucht werden, sicherer zu bauen als solche, die nur zum Aufbewahren von Lagergütern benützt werden. Dies um so mehr, als die Menschen, die in einem Versammlungsraum, auf einer Brücke usw. verkehren, häufig auch die massgebende Belastung ausmachen. Als Skala für ein relatives Abstufen der Sicherheitsmargen liesse sich etwa die Anzahl Menschen setzen, die sich im Zeitpunkt eines mutmasslichen Unfalles im Bereich des Bauwerks aufhalten und somit in Gefahr kämen. Damit ist aber nur etwas über die verhältnismässige Höhe der Sicherheitsmarge ausgesagt.

Um sie hingegen quantitativ festzulegen, müssen wir die Erfahrung heranziehen: «Die bisher verwendeten Sicherheitsbeiwerte haben befriedigt (..oder nicht befriedigt..), also besteht kein (..ein..) Grund, sie zu erhöhen oder zu vermindern.»

Auch hier verzichten wir auf eine weitere Diskussion, weil sie ins Gebiet der Ethik und der Sozialwissenschaften führte. Grundsätzlich müsste man sich natürlich klar werden über das Problem des Wertevergleichs zwischen Menschenleben und Kostenaufwand, das aber mit den Mitteln der technischen Wissenschaften nicht entschieden werden kann.

5.3. Formales zur Variation der Sicherheitsmargen

5.3.1. Zusammenstellung der Variablen

Die acht zum Teil nicht mathematisch darstellbaren Variablen, die in *5.2.* als bedeutsam kurz besprochen wurden, sollen durch die Grössen $X_1 \ldots X_8$ bezeichnet werden. Den X_i ordnen wir Werte zu: $X_i = 1,2,3$, so dass dort, wo wegen der Variablen X_i die Sicherheitsmarge einen niedrigen, mittleren oder hohen Wert erhält, die respektiven Zahlenwerte 1,2,3, für die Variable X_i stehen. Wir gliedern in höchstens drei, manchmal zwei Klassen, weil eine feinere Stufung auf ein zumindest für diese grundsätzliche Untersuchung zu kompliziertes System führen würde.

Die Variablen stehen für die folgenden Argumente:

X_1 Unsicherheit bei den Materialeigenschaften
X_2 Ungenauigkeit der Abmessungen
X_3 Fehler bei der Belastungsannahme
X_4 Unschärfe der Berechnung und Bemessung
X_5 Verlässlichkeit der Kontrollen
X_6 Art der Beanspruchung
X_7 Schaltung des Tragwerks, «innere Unfallfolgen»
X_8 Inhalt und Umgebung des Bauwerks, «äussere Unfallfolgen»

5.3.2. Reduktion der Variablenzahl

Mit acht je in drei Stufen gegliederten Variablen ergäbe sich eine Zahl von

$$3^8 = 6561$$

verschiedene Sicherheitsfaktoren. Ein solches System ist aber für die Handhabung zu unübersichtlich. Es müssen deshalb einzelne Variable fallengelassen oder zusammengefasst werden. Die Gründe für das im folgenden gewählte Vorgehen sind in Abschnitt *5.2.* enthalten. Sie werden nur noch in ihren wesentlichen Zügen rekapituliert.

X_4 Unschärfe der Berechnung und Bemessung
X_5 Verlässlichkeit der Kontrollen

Eine Variation nach diesen beiden Argumenten lässt sich nicht praktisch durchführen, weil es keine adäquaten Masstäbe für die Abweichungen gibt, die daraus hervorgehen bzw. durch die Kontrollen reduziert werden.

X_1 Unsicherheit bei den Materialeigenschaften
X_6 Art der Beanspruchung

Diese beiden Variablen sind in ihren Konsequenzen nicht zu trennen: Wo Beton über die Tragfähigkeit entscheidet, muss notwendigerweise mit einem spröden Verhalten gerechnet werden. Umgekehrt treten meist plastische Verformungen auf, wo Stahleinlagen für den Widerstand eines Gliedes massgebend sind. Wir fassen die beiden Variablen zu einer einzigen zusammen: Y_1.

X_7 Schaltung des Tragwerks, «innere Unfallfolgen»

Diese Variable muss gesondert behandelt werden, weil sie bei verschiedenen Methoden der Bemessung auf verschiedene Weise einzusetzen ist, um ein sinnvolles Sicherheitsverhalten zu erzeugen. Sie ist speziell für die Anwendung bei den plastischen Bemessungsmethoden gedacht, und ihre Handhabung wird in Beispiel *6.2.* kurz vorgeführt.

5.3.3. Die Wahl der Zahlenwerte

Der quantitative Grundansatz des Sicherheitsfaktors lässt sich nach Abschnitt 4 nicht wissenschaftlich begründen. Weder lässt sich über statistische Daten noch über wahrscheinlichkeitstheoretische Überlegungen zuverlässig darauf schliessen, in welcher Höhe die Sicherheitsmargen allgemein zu wählen sind. Wir stützen uns deshalb für die zentralen Werte unseres Vorschlages auf bisher übliche Sicherheitsmargen, wobei allerdings eine veränderte und vermehrte Variation nach zum Teil neuen Erfordernissen offen bleibt.

Das System der Sicherheitsfaktoren ist so dargestellt, dass für jeden Bemessungsfall ein einfacher Sicherheitsfaktor aus einer Tabelle abgelesen werden kann, nachdem aus einer Klassifikation der Bemessungsfälle die Tabellenparameter (X_i) bestimmt worden sind. Der Zusatzfaktor S' wird *5.4.5* noch speziell besprochen, da er formal nicht in die Tabelle eingefügt werden kann.

Die Klassifikation der Bauwerke nach den Tabellenparametern findet sich in Abschnitt *5.4.* Zur Vereinfachung sollen die Bezeichnungen der nach der Reduktion von *5.3.2.* verbleibenden Variablen vereinheitlicht werden:

Y_1 Materialeigenschaften und Beanspruchungsart
Y_2 Abmessungen
Y_3 Belastungsannahme
Y_4 Inhalt und Umgebung des Bauwerks. Risiko und Folgen

5.4. Klassifikation der Bemessungsfälle

Vorschlag, stichwortartig

*5.4.1. Materialeigenschaften und Beanspruchung**

$Y_1 = 1$ Querschnitte mit $\mu \leq \mu_{Gr} \cdot 0{,}8$
Reine Biegung, Biegung mit Axialkraft

$Y_1 = 1$ Alle Querschnitte mit $\mu > \mu_{Gr} \cdot 0{,}8$
Biegung, Biegung mit Axialkraft, zentrischer Druck

$Y_1 = 3$ Alle Fälle von Schub und Torsion
(Da Schub und Torsion nie, bzw. fast nie allein auftreten, muss hier eine Regel beigegeben wer-

*) Statt in drei müsste Y_1 wohl in mehr Klassen variiert werden, damit keine so scharfe und einschneidende Grenze bei μ_{Gr} auftritt, was ja auch den tatsächlichen Verhältnissen nicht entspricht.

den, wo überhaupt eine Bemessung auf Schub oder Torsion stattfinden muss. Siehe *5.4.6.*

5.4.2. Abmessungen

$Y_2 = 1$ Querschnitte, bei denen die statische Höhe wenigstens 18 cm und der grösste Stahlquerschnitt höchstens $\frac{h}{8}$ beträgt.

$Y_2 = 2$ Alle Querschnitte, bei denen die statische Höhe kleiner ist als 18 cm und/oder der grösste Stahlquerschnitt $\frac{h}{8}$ überschreitet.

5.4.3. Belastungsannahme

$Y_3 = 1$ Bauten, bei denen das totale Eigengewicht mehr als die Hälfte der höchsten Gesamtbelastung beträgt, sowie Bauten, bei denen die Belastung durch geometrische Gegebenheiten auf den Rechenwert beschränkt ist (Behälter usw.).

$Y_3 = 2$ Bauten, bei denen das Eigengewicht weniger als die Hälfte der höchsten Gesamtbelastung beträgt.

$Y_3 = 3$ Bauten, die nicht mehr ihrem ursprünglichen Zweck entsprechend verwendet werden; Lagerhäuser für gemischte Güter, spezielle Fälle, wo die wirkliche Belastung sehr schlecht bekannt ist.

5.4.4. Inhalt und Umgebung des Bauwerks

$Y_4 = 1$ Reine Lagerhäuser, Schuppen, Maschinenhäuser; alle Bauten, in denen sich nie mehrere Menschen für längere Zeit aufhalten (diese Klassifikation müsste selbstverständlich für einen Normvorschlag schärfer formuliert werden, wofür hier nicht der Ort ist).

$Y_4 = 2$ Wohn- und Bürohäuser, Strassen- und Fussgängerbrücken, Industriebauten, Gasthäuser.

$Y_4 = 3$ Kirchen, Versammlungshäuser, Warenhäuser, Theater, Kinos, Eisenbahnbrücken.

5.4.5. Funktion des Traggliedes

Alle Unterstützungen wie Rahmenstiele, Säulen, Wände erhalten den Zusatzfaktor $S' = 1{,}4$, soweit sie nicht schon aus einem anderen Grunde der Klasse $Y_1 = 2$ zugeordnet sind. Bei der Bemessung nach der Mechanismusmethode gilt der Zusatzfaktor für alle jene Bruchmechanismen, die nicht auf horizontale Tragglieder beschränkt sind.

5.4.6. Schematische Zusammenstellung
(Zu *Tabelle 1*)

In Tabelle 1 sind die Werte des Sicherheitsfaktors $\bar{S}$ eingetragen, die sich nach der Variation der Klassenparameter ergeben: $\bar{S}\ (Y_1, Y_2, Y_3, Y_4)$.

Tabelle 1

	Y_1	1		2		3	
	Y_2	1	2	1	2	1	2
Y_3	Y_4						
1	1	1111 1,5	1211 1,6	2111 2,4	2211 2,6	3111 2,4	3211 2,6
	2	1112 1,6	1212 1,7	2112 2,5	2212 2,7	3112 2,8	3212 3,0
	3	1113 1,8	1213 1,9	2113 3,0	2213 3,2	3113 3,2	3213 3,5
2	1	1121 1,5	1221 1,6	2121 2,5	2221 2,7	3121 2,5	3221 2,7
	2	1122 1,6	1222 1,8	2122 2,6	2222 2,8	3122 2,9	3222 3,1
	3	1123 1,8	1223 2,0	2123 3,2	2223 3,4	3123 3,5	3223 3,8
3	1	1131 1,6	1231 1,8	2131 2,6	2231 2,8	3131 2,6	3231 2,8
	2	1132 1,7	1232 1,9	2132 2,8	2232 3,0	3132 3,5	3232 3,8
	3	1133 2,0	1233 2,2	2133 3,4	2233 3,7	3133 4,0	3233 4,2

Die Werte $\bar{S}$ sind zugleich als Mediane der mutmasslichen Verteilung des tatsächlichen Sicherheitsfaktors zu verstehen. Dementsprechend sind in der statischen Berechnung die Tragfähigkeit und die Belastung und somit auch alle übrigen Daten durch Mediane ihrer Verteilungen zu repräsentieren. Es werden neben dem Sicherheitsfaktor $\bar{S}$ keine zusätzlichen Reduktions- oder sonstigen Beiwerte gebraucht, da die gesamte notwendige Sicherheitsmarge in der Zahl $\bar{S}$ vereinigt ist.

Zur Illustration seien nochmals die Bedingungen kurz aufgeführt, die zu diesem Vorschlag führten:

1. Alle Grössen, die in einer statischen Berechnung oder Bemessung vorkommen, sind Schätzungen. Auch die Resultate dieser Rechnungen sind somit geschätzte Werte (T und P, S).

2. Da keine lückenlose Beziehung zwischen dem Sicherheitsfaktor und statistischen Eigenschaften der Rechenparameter hergestellt werden kann, müssen einige Richtwerte für die Sicherheitsmarge an die bisherige Bemessungspraxis (Normen) angelehnt werden. Für die Werte $\bar{S}$ (1112), $\bar{S}$ (1122), $\bar{S}$ (1222) sowie für den Grundwert $\bar{S}$ (2...) aller unter $Y_1 = 2$ stehenden Faktoren ist dies geschehen. Referenz dafür sind die Bruchsicherheitsbestimmungen in SIA-Norm 162 [53].

Für die Schubbemessung ($Y_1 = 3$) konnten keine solchen Referenzen herangezogen werden, da diese nur mit elastischen Methoden durchgeführt worden sind. Die Zahlen in diesen Kolonnen sind so zu verstehen, dass sie mit einer möglichst adäquaten Bruchformel zusammen zu verwenden sind, sobald eine solche zur Verfügung steht.

Bisher war es üblich, den Bruch eines Trägers mit hoher Schubbeanspruchung durch verhältnismässig hohe Sicherheitsmargen auszuschliessen. Dies ist auch sinnvoll, da der Schubbruch meist sehr plötzlich (spröde) erfolgt, und weil es in der Regel mit kleinem Aufwand möglich ist, diese Art des Versagens zu vermeiden.

3. Der Zusatzfaktor S', der die Wichtigkeit der einzelnen Tragglieder repräsentiert, ist dort einzusetzen, wo nach den übrigen Bemessungsregeln ein Bemessungsfall ins Gebiet der «plastischen Querschnitte» einzuordnen wäre, wo die Funktion des Traggliedes aber eine höhere Sicherheit verlangt, weil sein Versagen schwere Folgen hätte (*6.2.*).

4. Die Annäherung der Sicherheitserfordernisse durch eine treppenförmige Variation des Sicherheitsfaktors entspricht nicht dem tatsächlichen Gehalt des Problems. Vor allem bei den Klassenparametern Y_2 und Y_3 mag die Abstufung etwas grob erscheinen. Sie wurde trotzdem so angesetzt, um die Übersichtlichkeit zu erhalten. Es wäre ohne weiteres möglich, durch eine feinere Unterscheidung den Verhältnissen genauer gerecht zu werden.

5. Der einfache Sicherheitsfaktor hat als Grundform der Sicherheitsmarge neben vielen Vorteilen auch einige Mängel. Vom methodischen Gesichtspunkt aus muss ihm, wie auch aus formalen Betrachtungen hervorging, der Vorzug vor anderen Möglichkeiten gegeben werden. Dem stehen gewisse praktische Argumente gegenüber, besonders, dass er bisher in der Bemessungspraxis des Stahlbetons üblicherweise nicht verwendet wurde und somit ein gewisses Umdenken verlangen würde. In einer Diskussion über solche Gesichtspunkte aber die Akzente (Gewichte) zu setzen, kann nicht Aufgabe einer technischen Untersuchung sein, weil es das Abwägen vieler verschiedener, zum Teil rein praktischer Bedürfnisse gegeneinander bedeutet. Die Frage nach dem am besten geeigneten System von Sicherheitsbeiwerten muss hier offen bleiben. Ein anderes Beispiel für die Wahl von Zahlenwerten findet man in den Arbeiten des ICBR [225].

6. Beispiele für die Verwendung des Sicherheitsfaktors

6.1. Stahlbetonquerschnitt mit exzentrischem Druck

(Beispiel für den Sicherheitsnachweis nach *4.2*; *5.*)

An einem doppelt armierten Betonquerschnitt von rechteckiger Form soll der Sicherheitsfaktor nachgewiesen werden.

Die Daten sind:

d = 24 cm	P = 40000 kg
d' = 2 cm	e = 2 cm
b = 18 cm	Fe = 7,7 cm² (5 × 14)
β = 250 kg/cm²	μ = 1,78%
σ_F = 3500 kg/cm²	Fe, μ für einfache Armierung

Der Querschnitt sei Bestandteil einer kurzen Säule (Knicken oder Kriechen wird hier nicht berücksichtigt).

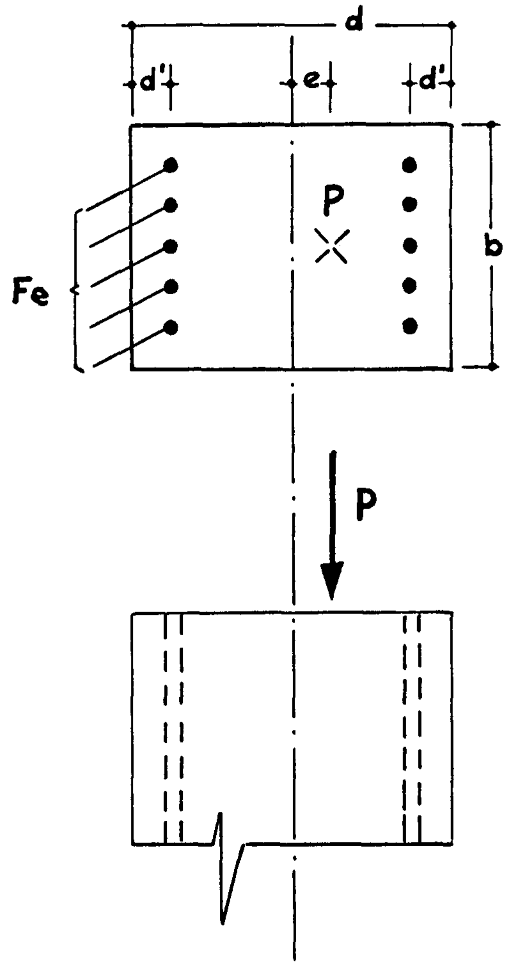


Abb. 11

Die kleine Exzentrizität führt auf: $Y_1 = 2$. Die statische Höhe ist grösser als 18 cm, somit ist $Y_2 = 1$. Die Säule sei Bestandteil eines Versammlungshauses: $Y_4 = 3$. Die Belastungsannahme gehöre zur Klasse $Y_3 = 2$. Damit gehört der Bemessungsfall in die Klasse 2123 und der Sicherheitsfaktor beträgt nach *Tabelle 1*: $\hat{S} = 3{,}2$.

Unter der Annahme einer parabolischen Spannungsverteilung im Beton beim Bruchzustand ($\varepsilon_u = 3‰$) und elastisch-ideal plastischen Verhaltens des Stahles ergibt sich eine (mittlere) Tragfähigkeit von

$$T = 128\,000 \text{ kg}$$

Die Bemessungsbedienung heisst:

$$\hat{S} = 3{,}2 \leq \frac{T}{P} = \frac{128\,000}{40\,000}$$

und ist somit erfüllt.

Auf die ausführliche Berechnung des Querschnittswiderstandes T aus den angegebenen Daten wurde hier verzichtet, weil es sich um einen im einzelnen sehr komplizierten Prozess handelt. Der Wert von T ist einer *Tabelle* [34] entnommen.

6.2. Bemessung eines Stahlbetonrahmens

(Beispiel für direkte Bemessung)

Es sei ein zweistieliger Rahmen so zu bemessen, dass er den Sicherheitsmargen von *5.4.* entspricht. Er ist beidseitig voll eingespannt und rechteckig, sein Querschnitt ist über die ganze Länge konstant (Riegel und Stiele) *(Abb. 12)*.

Der Rahmen sei Bestandteil eines Gebäudes mit den Kennwerten $Y_4 = 3$, $Y_3 = 2$. Seine Abmessungen bedingen, dass $Y_2 = 1$, wie sich schon anfänglich abschätzen lässt.

Eine sinnvolle Dimensionierung verlangt, dass der Rahmen gegen jede mögliche Art des Einsturzes mit dem jeweiligen erforderlichen Sicherheitsfaktor geschützt ist. Y_1 ist somit je nach dem spezifischen behandelten Bemessungsdetail verschieden gross. Damit das Beispiel nicht zu umfangreich wird, soll auf die Schubbemessung verzichtet werden, in der Annahme, sie werde als Ergänzung nachgeholt.

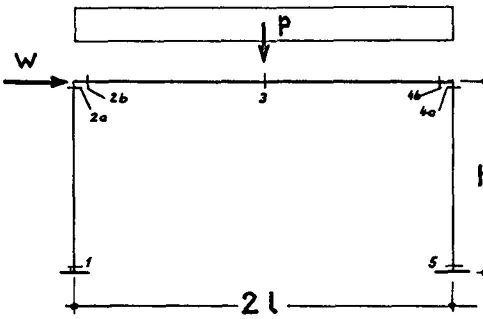


Abb. 12

Die Daten des Rahmens sind:

$$l = 5 \text{ m} \qquad p = 2000 \text{ kg/m}^1$$
$$W = 5000 \text{ kg} \qquad h = l = 5 \text{ m}$$

Eine Vordimensionierung ergibt die Trägerhöhe $d = 65$ cm und die Querschnittsbreite zu $b = 30$ cm. Damit beträgt das Eigengewicht $g = 500$ kg/m^1.

Im weiteren wird die Berechnung auf zwei verschiedenen Wegen geführt:

1. Bestimmung des Kräftespieles nach elastischen Methoden. Bemessung der Querschnitte nach dem Bruchkriterium.

2. Bemessung des ganzen Rahmens nach der Mechanismusmethode (Kräftespiel und Dimensionierung für den Bruchzustand).

Zum Vergleich werden zudem die Resultate einer Dimensionierung beigefügt, wie sie sich mit rein elastischen Methoden nach den Bestimmungen von SIA-Norm 162 ergibt.

6.2.1. Bestimmung des Kräftespiels: elastisch
Dimensionierung: Nach Bruchkriterium

Da die elastische Berechnung des Kräftespiels hier nicht interessiert, werden nur die Resultate (Grenzwertlinien) aufgeführt *(Abb. 13)*.

Aus den Grenzwertlinien der nominellen Belastungen lassen sich die notwendigen Querschnittswiderstände bestimmen; an jeder Stelle, die man untersucht, werden den Werten von M und N die entsprechenden Sicherheits-

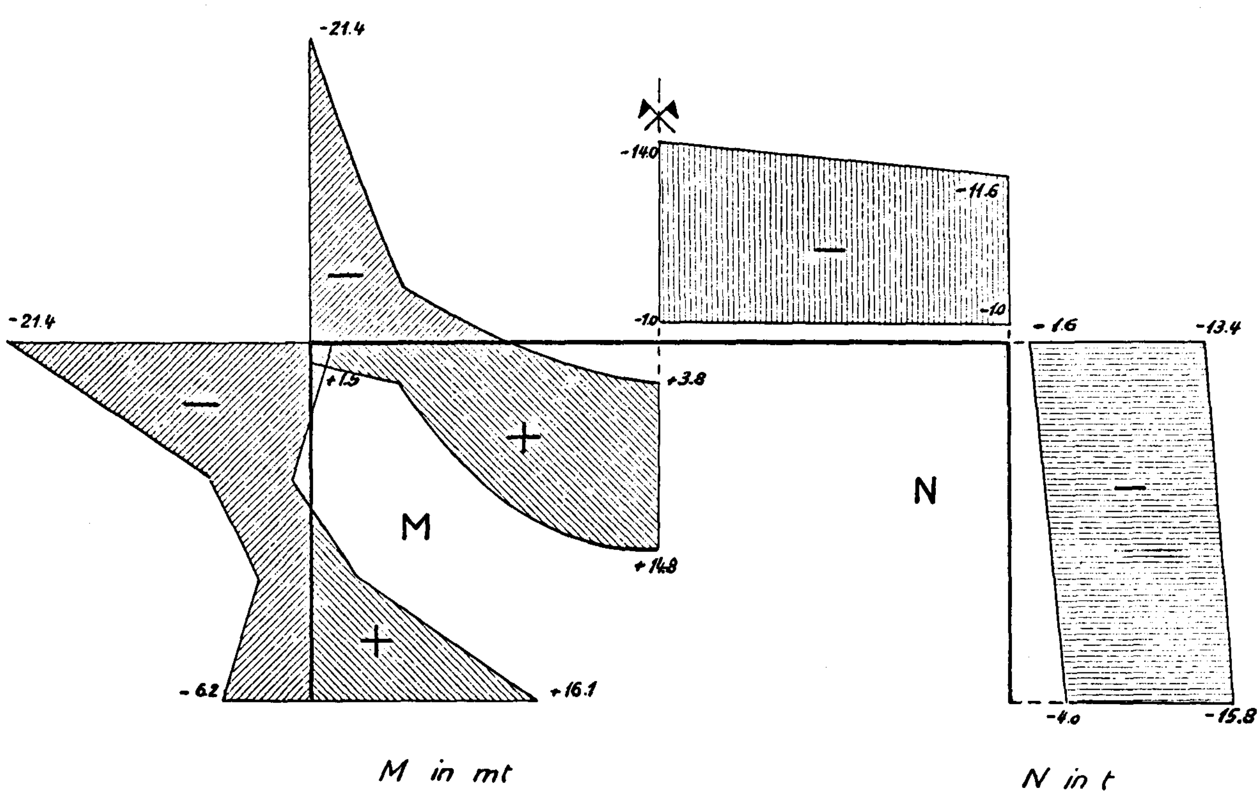


Abb. 13

faktoren zugeordnet, mit denen multipliziert sie gerade gleich dem nominellen Querschnittswiderstand werden sollen (Bemessungsbedingung).

Aus der Tabelle der Sicherheitsfaktoren ergibt sich für den Riegel :$\bar{S} = 1{,}8$;

Ebenfalls für die Rahmenstiele beträgt der notwendige Sicherheitsfaktor $\bar{S} = 1{,}8$, zu dem aber noch der Zusatzfaktor $S' = 1{,}4$ nach (*5.4.5.*) hinzumultipliziert werden muss, so dass der endgültige Sicherheitsfaktor der Stiele

$$\bar{S}' = 1{,}8 \cdot 1{,}4 = 2{,}5$$

beträgt.

Zu zeigen ist zusätzlich für jeden Querschnitt, dass er sich nicht spröde verhält ($\mu \leq 0{,}8 \cdot \mu_{Gr}$), da er sonst unter die Klasse $Y_1 = 2$ fallen würde und sein Sicherheitsfaktor entsprechend zu erhöhen wäre.

Die Konstruktion wird in vier Schnitten (1,2a, 2b, 3) untersucht. Es ergeben sich die notwendigen plastischen Momente aus der Bemessungsbedingung:

$$M_p = \bar{S} \cdot M_{max}$$

Sie betragen, nach den untersuchten Schnitten geordnet:

Schnitt	1	2a	2b	3
M^-_p in cmt	—1550	—5350	—3900	± 0
M^+_p	+4000	+ 400	+ 300	+2700

Die Bemessung kann nun mit diesen Grössen durchgeführt werden, indem man die nominellen Materialeigenschaften einsetzt. Dabei muss allerdings noch der Einfluss der Normalkraft berücksichtigt und der Nachweis gegeben werden, dass sich alle Querschnitte auch mit dem Einfluss der Normalkraft noch plastisch verhalten. Da aber diese Berechnung nicht mehr zur Handhabung des Sicherheitsfaktors gehört, verzichten wir hier auf ihre Darstellung. Da die Armierungsgehalte in keinem Fall mehr als 1,25% betragen, ist die Bedingung ohne weiteres überall erfüllt.

6.2.2. Bemessung nach der Mechanismusmethode

Für die Berechnung und Bemessung – beides erfolgt hier gewissermassen in einem Zug – nach der Mechanismusmethode setzen wir voraus, dass andere Arten des Versagens (Bruch von Querschnitten infolge Schubs usw.) ausgeschlossen sind, im gleichen Sinne wie bei *6.2.1.* Dann gibt es drei verschiedene Arten des Zusammenbruchs («unabhängige Mechanismen» oder «unabhängige kinematische Ketten», *Abbildung 14–16*). Sie sind ausgezeichnet durch die Lage der plastischen Gelenke, wobei ausserdem noch zu unterscheiden ist, ob die Gelenke in der Rahmenecke sich im Bereich des Stiels oder des Riegels ausbilden. Durch konstruktive Massnahmen kann aber leicht bewirkt werden, dass sie mit grosser Wahrscheinlichkeit in den Riegel zu liegen kommen; deshalb soll diesem Punkt keine weitere Beachtung geschenkt werden.

Der Balkenmechanismus von *Abbildung 14* verlangt nach *5.4.5.* den Sicherheitsfaktor $\bar{S}_1 = 1{,}8$.

Die beiden andern Mechanismen müssen nach *5.4.5.* mit einem Gesamtfaktor von $\bar{S}_2 = 1{,}8 \cdot 1{,}4 = 2{,}5$ gesichert werden, analog der Berechnung bei *6.2.1.*, wobei wiederum vorausgesetzt ist, dass keine spröden Stellen im Gelenkbereich zu finden sind.

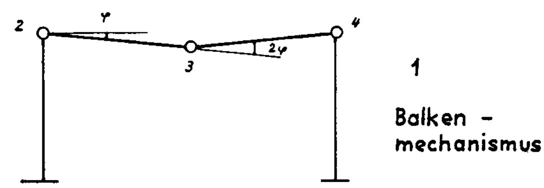


Abb. 14

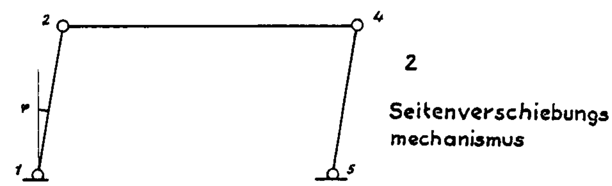


Abb. 15

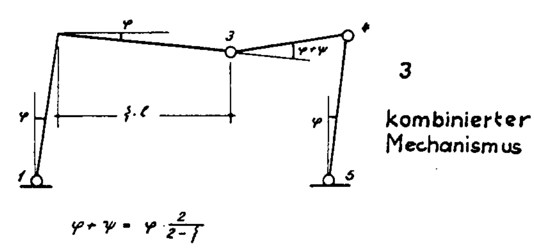


Abb. 16

Der Unterschied zwischen Mechanismus 1 einerseits und 2 und 3 anderseits mag bei diesem einfachen zweistieligen Rahmen nicht sehr gewichtig erscheinen. Mechanismus 1 ist Beispiel für einen rein lokalen Einsturz, während die andern beiden das gesamte Tragwerk in Mitleidenschaft ziehen. Das Versagen des Riegels allein gefährdet nur den Raum unmittelbar unter dem Balken; ein seitliches Umstürzen hingegen hat auch Auswirkungen ausserhalb des eigentlichen Bereiches des Tragwerks. Viel offensichtlicher wird dieser wesentliche Unterschied bei mehrstieligen und mehrstöckigen Rahmen, wo ein Seitenverschiebungsmechanismus den Zusammenbruch eines ganzen Gebäudes zur Folge haben kann, während ein Balkenmechanismus immer noch lokal beschränkt bleibt.

Mechanismus 3 weist eine Besonderheit auf: Das Gelenk im Riegel tritt theoretisch nicht in der Mitte des Rahmens auf. Seine Lage ist vom Widerstand der anderen Gelenke abhängig ($x = \xi \cdot l$).

Für die Bemessung ist es bequem, wenn man den Sicherheitsfaktor zur Belastung schlägt, die jeweils untersucht wird ($g + p$, $g + W$, usw.).

Formuliert man nun die drei Gleichungen zwischen innerer und äusserer Arbeit nach dem Prinzip der virtuellen Verschiebungen, so ergeben sich für die drei Mechanismen die folgenden Beziehungen:

$$(p + g) \cdot l^2 \cdot \bar{S}_1 \cdot \varphi = (M^-_2 + 2 \cdot M^+_3 + M^-_4) \cdot \varphi \qquad (77)$$

$$W \cdot l \cdot \bar{S}'_2 \cdot \varphi = (M^-_1 + M^+_2 + M^-_4 + M^+_5) \cdot \varphi \qquad (78)$$

$$\left(W \cdot l + (g + p) \cdot l^2 \cdot \frac{1}{2-\xi}\right) \cdot \bar{S}'_2 \cdot \varphi = \left(M^-_1 + \frac{2}{2-\xi}\left(M^+_3 + M^-_4\right) + M^+_5\right) \cdot \varphi \qquad (79)$$

Ersetzt man in jeder Gleichung das Gleichheitszeichen durch ein $\leq$, so entstehen daraus die Sicherheitsungleichungen der drei Bruchmechanismen. Sie lauten in Zahlen:

$$11\,200 \leq M^-_2 + 2\, M^+_3 + M^-_4 \qquad (80)$$

$$6200 \leq M^-_1 + M^+_2 + M^-_4 + M^+_5 \qquad (81)$$

$$6200 + 15\,600 \cdot \frac{2}{2-\xi} \leq M_1^- + \frac{2}{2-\xi}(M^+_3 + M^-_4) + M^+_5 \qquad (82)$$

Näherungsweise kann man die Grösse ξ durch 1 ersetzen – eine genaue Rechnung ergäbe 0,92, was aber von sehr geringem Einfluss auf Ungleichung 82 ist –, und wir erhalten drei Ungleichungen eines linearen Programmes für die Werte der plastischen Momente:

$$M^-_1 + 2 \cdot M^+_3 + M^-_4 - 11\,200 \geq 0$$
$$M^-_1 + M^+_2 + M^-_4 + M^+_5 - 6\,200 \geq 0$$
$$M^-_1 + 2 \cdot M^+_3 + 2 \cdot M^-_4 + M^+_5 - 21\,800 \geq 0$$

Aus der Symmetrie des Systems und der Belastung (W kann von beiden Seiten her auftreten) ergeben sich die Beziehungen:

$$M^-_1 = M^-_5 \qquad M^+_1 = M^+_5$$
$$M^-_2 = M^-_4 \qquad M^+_2 = M^+_4$$

Die Ungleichungen lassen sich damit vereinfachen:

$$2 \cdot M^-_2 + 2 \cdot M^+_3 - 11\,200 \geq 0$$
$$M^+_1 + M^-_1 + M^+_2 + M^-_2 - 6\,200 \geq 0$$
$$M^-_1 + M^+_1 + 2 \cdot M^+_2 + 2 \cdot M^-_2 - 21\,800 \geq 0$$

Aus dem linearen Programm müssen somit fünf Unbekannte bestimmt werden. Damit keine der Grössen beim Optimalisieren negativ wird oder einen zu grossen Wert erhält, der konstruktiv nicht mehr zu erreichen wäre (spröde Querschnitte bei hohem Armierungsgehalt), müssen noch Begrenzungen nach unten und oben eingeführt werden:

$$M^+_1 - 1000 \geq 0 \qquad - M^+_1 + 4000 \geq 0$$
$$M^-_1 - 3000 \geq 0 \qquad - M^-_1 + 1500 \geq 0$$
$$M^+_2 - \quad 0 \geq 0 \qquad - M^+_2 + 1000 \geq 0$$
$$M^-_2 - 3000 \geq 0 \qquad - M^-_2 + 6000 \geq 0$$
$$M^+_3 - 2000 \geq 0 \qquad - M^+_3 + 4000 \geq 0$$

Hinzu tritt eine Zielfunktion, die etwa die verhältnismässigen Kosten repräsentiert, die sich aus der Armierung der verschiedenen Querschnitte ergeben:

$$4 \cdot M^+_1 + 3 \cdot M^-_1 + 4 \cdot M^+_2 + 7 \cdot M^-_2 + 6 \cdot M^+_3 = z$$

Tab. 2 / Lineares Programm für M_p

	M_1^+	M_1^-	M_2^+	M_2^-	M_3^+	1
f_1	0	0	0	+2	+2	- 11200
f_2	+1	+1	+1	+1	0	- 6200
f_3	+1	+1	0	+2	+2	- 21800
f_4	+1	0	0	0	0	- 1000
f_5	0	+1	0	0	0	- 3000
f_6	0	0	+1	0	0	- 500
f_7	0	0	0	+1	0	- 3000
f_8	0	0	0	0	+1	- 2000
f_9	-1	0	0	0	0	+ 4000
f_{10}	0	-1	0	0	0	+ 1500
f_{11}	0	0	-1	0	0	+ 1000
f_{12}	0	0	0	-1	0	+ 6000
f_{13}	0	0	0	0	-1	+ 4000
z	+4	+3	+4	+7	+6	0

Das gesamte lineare Programm hat dann die Form von *Tabelle 2.* Seine Lösung lautet:

$M^+_1 = 3500$ cmt
$M^-_1 = 1500$ cmt
$M^+_2 = 0$
$M^-_2 = 4900$ cmt
$M^+_3 = 3500$ cmt

Die Kontrolle der Plastizitätsbedingungen (Prinzip der virtuellen Verschiebungen) ergibt:

$$f_1 = 2 \cdot M^-_2 + 2 \cdot M^+_3 = 16\,700 > 11\,200$$
$$f_2 = M^+_1 + M^-_1 + M^+_2 + M^-_2 = 8\,550 > 6\,200$$
$$f_3 = M^+_1 + M^-_1 + 2 \cdot M^-_2 + 2 \cdot M^+_3 = 21\,800 = 21\,800$$

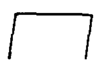
Sie sind also erfüllt. Setzt man die Werte von f_i in die erste Form der Plastizitätsbedingungen ein (80 bis 82), so lässt sich für jeden Mechanismus der Sicherheitsfaktor berechnen. Um diesen Faktor müsste also die Belastung erhöht werden, damit das Tragwerk nach dem betreffenden Bruchmechanismus einstürzt – vorausgesetzt natürlich, dass es vorher nicht auf andere Weise schon zusammengebrochen ist *(Tab. 4)*.

In gleicher Weise wie bei *6.2.1.* folgt nun die Bemessung der einzelnen Querschnitte, deren Resultat in *Tabelle 3* ebenfalls dargestellt ist.

Tab. 3. / Erforderliche Armierung Fe

Schnitt	I. Berechnung elastisch Bruchbemessung der Querschnitte		II. Bemessung nach der Mechanismusmethode		III. Berechnung und Bemessung elastisch	
	Fe cm^2 innen	Fe cm^2 aussen	Fe cm^2 innen	Fe cm^2 aussen	Fe cm^2 innen	Fe cm^2 aussen
1	14,0	5,7	12,8	4,2	11,8	6,0
2a	4,0	18,0	0	19,0	4,0	17,1
2b	4,0	17,0	0	22,8	8,8	19,5
3	11,1	0	16,9	0	13,5	0

Tab. 4 / Sicherheitsfaktoren

Berechnungs- und Bemessungsmethode	Mechanismus 		
I. Berechnung elastisch, Bruchbemessung der Querschnitte	2,15	4,5	2,3
II. Bemessung nach der Mechanismusmethode	2,7	4,0	2,5
III. Berechnung und Bemessung elastisch	2,4	5,0	2,2

Die Mechanismusmethode erlaubt es, die Momentenverteilung (Kräftespiel) bei gegebener Belastung in gewissen Grenzen zu variieren. Es kann so, wie im Beispiel gezeigt wurde, die beste Anordnung der Armierung gesucht werden.

Die genaue Bemessung der Querschnitte mit Berücksichtigung der Normalkräfte verlangt einen Iterationsprozess, den wir hier weglassen, weil er nicht zur Sache gehört. Ebenfalls verzichten wir auf den Nachweis, dass keine spröden Stellen unter den als plastische Gelenke eingeführten Querschnitten sind (siehe *6.2.1.*).

Aus den Resultaten (*Tabellen 3* und *4*), die sich nach den drei verschiedenen Berechnungsmethoden für den Rahmen ergaben, lassen sich für dieses Beispiel die folgenden Schlüsse ziehen:

1. Die Methode der plastischen Bemessung der Querschnitte führt etwa auf den gleichen Materialaufwand wie die Mechanismusmethode. Die rein elastische Bemessung nach SIA-Norm erfordert hingegen etwa 10% mehr Armierung.

2. Mit Hilfe der Mechanismusmethode ist es möglich, die wirklich in Frage kommenden Bruchprogramme der Bemessung zugrunde zu legen. Das ist ein wesentlicher Unterschied gegenüber den beiden anderen Methoden, wo nur der Widerstand der einzelnen Querschnitte untersucht wird, ohne dass das Verhalten des ganzen Systems betrachtet werden kann. Dies äussert sich darin, dass bei den Resultaten der Mechanismusmethode alle Sicherheitsfaktoren für die einzelnen Mechanismen eingehalten sind.

Beide anderen Methoden führen dazu, dass trotz grösserem Materialaufwand der geforderte Sicherheitsfaktor von Mechanismus Nr. 3 unterschritten wird. Bei diesen Konstruktionen wäre also die gesamte Bruchwahrscheinlichkeit grösser (vgl. *3.6.*). Bei der Methode III (rein elastische Bemessung) wird sogar der Sicherheitsfaktor gegen den folgenschweren Mechanismus 3 am kleinsten; das bedeutet, dass, wenn das Tragwerk versagen sollte, es aller Wahrscheinlichkeit nach auf diese Weise zusammenbrechen müsste. Dies ist ein ernster Einwand gegen die Bemessung mit elastischen Methoden. Wie weit er ausserhalb dieses Beispieles noch gilt, ist allerdings eine Frage, die offen bleibt.

3. Eine vollständige Übereinstimmung der Sicherheitsfaktoren bei allen drei Bemessungsmethoden lässt sich nicht erzielen, auch wenn für jede Methode besondere Vorschriften aufgestellt würden. Der Beweis für diese Behauptung kann in Worten gegeben werden:

Bei der rein elastischen und bei der «elastisch-plastischen» Bemessungsmethode ist das Kräftespiel fest gegeben. Bei der Mechanismusmethode kann man es dagegen (für den Bruchzustand) in gewissen Grenzen frei variieren. Das Verhältnis verschiedener Sicherheitsfaktoren zueinander hängt aber vom Kräftespiel direkt ab (80 ff.). Ist nun dieses nach verschiedenen Methoden bestimmt worden, so sind für die verschiedenen Resultate auch die Sicherheitsfaktoren nicht gleich. Man muss sich also mit einer genäherten Übereinstimmung begnügen.

Die Bemerkung über die Sicherheitsfaktoren der verschiedenen Bruchmechanismen (Kommentar zu *Tabelle 4*) klingt banal, solange man von der konventionellen Auffassung ausgeht, dass die Werte einer statischen Berechnung fest bestimmte Grössen seien. Lässt man hingegen diese Voraussetzung fallen und betrachtet insbesondere die Querschnittswiderstände als statistisch veränderliche Grössen, so ist es nicht mehr selbstverständlich, nach welchem Bruchprogramm ein Tragwerk einstürzen wird. Besonders, wenn die Sicherheitsfaktoren zweier Mechanismen sich nur wenig unterscheiden, wie zum Beispiel diejenigen von Mechanismus 1 und 3, so besteht für beide Arten eines Zusammenbruchs eine Wahrscheinlichkeit von ähnlicher Grössenordnung. Es ist also durchaus möglich, dass der Rahmen (z. B. mit den Bemessungsdaten von Methode I), obwohl er gegen Mechanismus 1 einen kleineren Sicherheitsfaktor aufweist, doch durch eine Seitenverschiebung einstürzt – weil etwa der Riegel etwas stärker und die Stiele etwas schwächer waren als vorgesehen.

Dies ist eine wichtige Konsequenz aus der statistischen Auffassung der statischen Berechnung. Sie führt – wie bei Methode II (Mechanismusmethode) – auf eine neuartige Deutung der Sicherheit. Anstelle eines Standardkriteriums (Risse, Deformationen, Plastifizierung eines Querschnittes usw.), gegen welches man sich mit einem ebenso standardisierten Sicherheitsfaktor schützte, kann man nun verschiedene Möglichkeiten eines potentiellen Unfallablaufs nebeneinander untersuchen und sich je nach der Gefährlichkeit jedes einzelnen Bruchprogramms verschieden stark dagegen sichern.

7. Zusammenfassung, Schlüsse

Das Problem der Sicherheit bei der Bemessung der Tragwerke lässt sich grundsätzlich als eine Art Prognose auffassen. Gelingt es nämlich, aus den vielen und vielfältigen Informationen, die wir aus der Forschung und von bereits bestehenden Bauwerken ableiten können, auf die Eigenschaften eines spezifischen zukünftigen Tragwerks zu schliessen, so bedeutet dies die Lösung des Sicherheitsproblems.

Zu einem solchen Schluss ist es notwendig, dass die Daten und Eigenschaften der Referenz, auf die man ihn stützt – hier die Gesamtheit der Bauten – möglichst gut bekannt sind. Das ist eine Voraussetzung, die bei den Tragwerken nur sehr mangelhaft erfüllt ist. Neben diskreten, spezifischen Auskünften über einen Teil ihrer Eigenschaften (Parameter) steht oft nur eine Menge unsicherer Schätzungen zur Verfügung, die nicht einzelne Parameter betreffen, sondern Grössen, die selbst schon komplizierte Funktionen mehrerer Bauwerkseigenschaften sind. In der Hauptsache lassen sich zwei Arten von Informationen unterscheiden:

1. Beobachtungen, Versuchsresultate und statistische Schätzungen über einzelne Eigenschaften der Tragwerke. Sie beschränken sich auf einen Teil aller Parameter, nämlich vor allem die Festigkeit der Baumaterialien und einzelner Tragglieder, sowie gewisse Arten von Belastungen.

2. Die allgemeine Erfahrung. Sie muss überall dort substituiert werden, wo keine besseren Informationen zur Verfügung stehen. Die Erfahrung ist eine Form der Erkenntnis, die sich nicht streng wissenschaftlich deuten lässt, und muss deshalb als ziemlich ungenau betrachtet werden. Anderseits ist sie das Produkt eines sehr lang dauernden Prozesses, der die – allerdings unsystematische – Beobachtung sehr vieler Bauwerke umfasst. Aus diesem Grunde muss der Erfahrung bei der Diskussion um das Sicherheitsproblem ein hohes Gewicht beigemessen werden. Sie lässt sich auf alle Grössen anwenden, die mit dem Bauwesen in Zusammenhang stehen, nicht zuletzt auch auf deren Beziehungen zur Sicherheit selbst: Wir kennen ungefähr die Anzahl der Schäden und Unfälle, die an Bauten auftreten, wie besitzen Informationen über ihre Ursachen und haben somit aus der Erfahrung eine Schätzung für die Sicherheit der bisher erstellten Tragwerke.

Die Resultate der beiden Arten von Informationen führen meist nicht auf die gleichen quantitativen Schlüsse für die erforderlichen Sicherheitsmargen. Sie widersprechen sich, wenn ein solcher Schluss bei der grossen Unsicherheit und Unvollständigkeit der beiden Informationsquellen überhaupt zulässig ist.

Nach den statistischen Auskünften, die sich über einzelne Parameter der Sicherheit ergeben haben, lässt sich eine Schätzung für die zu erwartende Sicherheit errechnen. Sie liegt in der Grössenordnung von $1-10^{-6}$ bis $1-10^{-8}$, wenn man von den Verteilungsfunktionen ausgeht, die üblicherweise für die Streuung der Bauwerkseigenschaften eingesetzt werden. Nach allgemeiner Erfahrung beträgt aber die Wahrscheinlichkeit des Versagens bei einem beliebigen Bauwerk etwa $1-10^{-3}$ bis $1-10^{-5}$. Für diese schlechte Übereinstimmung muss es eine Ursache geben.

Zur Deutung dieser Ursache ergab sich aus Überlegungen zur Art und Herkunft der Fehler eine Vermutung:

Dass die Schadenfälle häufiger sind, als nach statistischen Berechnungen auf Grund der zufälligen Abweichungen zu erwarten wäre, ist dem Auftreten grober Fehler zuzuschreiben, die in statistischen Ermittlungen meist nicht erfasst werden können. Diese wiederum haben ihre Ursache im Menschen selbst, der als Hersteller und Benützer der Bauten für alles verantwortlich ist, was an ihnen ausser dem rein Zufälligen und Unvermeidlichen geschieht. Spezifischer ausgedrückt sind Unzuverlässigkeit, Fahrlässigkeit und mangelndes Wissen die direkte Ursache der groben Fehler und damit der meisten Unfälle. Dieselbe Vermutung findet sich auch in der juristischen Betrachtungsweise, die fast immer die Schuld an einem Unfall einer an der Herstellung oder Benützung des betroffenen Tragwerks beteiligten Person zuweist.

Bedenkt man, dass der Mensch an jeder Stelle und in jeder beliebigen Form Fehler begehen kann, so ist die Vermutung als möglich erwiesen. Ein Beweis, dass die Hypothese für jeden Fall gilt, kann nicht erbracht werden; in spezifischen Fällen hingegen ist dies sehr oft möglich.

Hält man somit an der Hypothese fest, so stellt sich die Frage, ob und wie weit der Ansatz der Sicherheitsmargen auf die Tatsache des Auftretens grober Fehler Rücksicht zu nehmen habe. Hierauf gibt es von verschiedenen Gesichtspunkten aus zwei verschiedene Antworten.

1. Solange sich grobe Fehler weder nach Art noch nach Häufigkeit vorausbestimmen lassen, können auch keine quantitativen, zahlenmässigen Grössen aus ihnen errechnet werden. Somit ist vorläufig noch keine explizite Beziehung zwischen Sicherheitsbeiwerten und Fehlern darstellbar.

2. Umgekehrt hat man mit den bisher gebräuchlichen Sicherheitsmargen eine annehmbare Sicherheit erzielt. Einen Beweis für diese Behauptung kann man darin sehen, dass die allgemeine Tendenz nicht auf eine Erhöhung der Sicherheitsbeiwerte (und damit der Sicherheit) abzielt. Das bedeutet, dass sie trotz des Vorkommens der groben Fehler genügten, und dass man Schadenfälle, die von Zeit zu Zeit auftreten, in Kauf nimmt. Aus der Praxis heraus hat sich also eine Art Gleichgewicht zwischen der Wirkung von Fehlern (Unfälle, Verluste)

und dem Kostenaufwand, der für die Sicherheitsmassnahmen notwendig ist, gebildet.

Da wir im einzelnen über die Begründung dieses Gleichgewichts nichts wissen, besteht auch kein Grund dafür, am Betrag der Sicherheitsmargen gesamthaft etwas zu ändern – und Gefahr zu laufen, das eingespielte Gleichgewicht zu stören. Dieser Schluss gilt allerdings nicht starr für alle einzelnen Sicherheitsbeiwerte, sondern nur für einige zentrale Richtwerte, wie zum Beispiel den allgemeinen Bruchsicherheitsfaktor für Biegung im Stahlbeton ($\bar{S} = 1{,}8$).

Dagegen lässt sich eine Variation von Sicherheitsfaktoren um diesen Richtwert herum nach speziellen, zum Teil neuen Gesichtspunkten wohl begründen. Als Beispiel soll hier der Aspekt (Massgabe) der Unfallfolgen erwähnt sein, der Folgen nämlich, die das Versagen des Tragwerks für dessen Inhalt und Umgebung nach sich ziehen würde: Es ist nicht dasselbe, ob ein untergeordneter Tragwerksteil über billigen Lagergütern einbricht, oder ob durch den Zusammenbruch eines ganzen Gebäudes viele Menschen in Gefahr kommen.

Ein anderer Aspekt des Sicherheitsproblems lässt sich in der Frage zusammenfassen, welche Form ein System von Sicherheitsmargen haben muss, um allen Erfordernissen praktischer und theoretischer Art möglichst gut gerecht zu werden. Die wichtigsten davon sind:

1. Die Sicherheitsmargen sollen den Verhältnissen eines speziellen Tragwerks durch eine übersichtliche, kodifizierte Variation Rechnung tragen. Das bedeutet, dass für jeden Bemessungsfall der erforderliche Sicherheitsbeiwert auf einfache Weise aus einer Zusammenstellung greifbar ist.

2. Der Zusammenhang zwischen dem Inhalt des Sicherheitsbegriffs und dem zugehörigen Vergleichswert (Sicherheitsmarge) muss einfach und möglichst gut rekonstruierbar sein.

3. Die Handhabung der Sicherheitsbeiwerte soll so einfach sein, dass durch ihre Verwendung die Probleme der Statik nicht wesentlich erschwert und ihre wahre Gestalt nicht entstellt wird.

4. Die Sicherheitsmargen sind auf ein bedeutsames Schadenkriterium zu stützen, zum Beispiel auf das allgemein gefasste Bruchkriterium (Unstabilwerden des Tragwerks). Grundsätzlich gilt, dass das Ereignis, gegen das man sich durch die Sicherheitsmarge schützen will, explizite in der statischen Berechnung repräsentiert sein muss.

5. Die Anwendung der Sicherheitsmargen darf nicht auf eine spezielle Theorie beschränkt sein, wie das zum Beispiel für die zulässigen Spannungen der Fall ist, die sich nur unter Voraussetzung der elastischen Theorie anwenden lassen.

Diese fünf Grundsätze lassen sich nicht alle gleichzeitig und vollkommen befriedigen, weil sie sich zum Teil widersprechen. Die Lösung, ein System von Sicherheitsbeiwerten, wird also das Resultat eines Optimalisierungsprozesses sein müssen, vergleichbar etwa den Aufgaben der Ausgleichsrechnung, wobei hier allerdings nicht mit algebraischen oder numerischen Grössen operiert werden kann, sondern vor allem methodische und praktische, formale und empirische Aspekte gegeneinander abgeschätzt werden müssen. Bei allen Ausgleichungsprozessen hängt das Resultat sehr stark von der Wahl der Gewichte ab, die den einzelnen Bedingungen zugeordnet werden. Die Wahl der Gewichte ist aber selbst bei den einfachen Aufgaben der Ausgleichsrechnung schwierig zu begründen. Ebensowenig kann auch die vorgeschlagene Lösung, ein System von Sicherheitsfaktoren (Abschnitt *5.*), für sich in Anspruch nehmen, die einzige und beste zu sein. Setzt man nämlich die Akzente anders, so kann sehr wohl eine andere Methode als die bessere erscheinen. Zum Beispiel hat man in den neueren Normen der USA und UdSSR [54, 55] kombinierte Material- und Lastfaktoren eingeführt, was gewissen – formalen – Argumenten widerspricht, andere – praktische – wieder besser befriedigt.

Dem zahlenmässigen Vorschlag für die Variation der Sicherheitsbeiwerte (*Tabelle 1*, Sicherheitsfaktoren) liegen – kurz gefasst – die folgenden Überlegungen zugrunde:

Für die quantitative Grundlage (Richtwerte) hat die Erfahrung der Baupraxis mit den bisher gültigen Sicherheitsbestimmungen überwiegendes Gewicht. Somit sind für jene Klassen, die die häufigsten Bauten umfassen, $Y_1 = 1{,}2$; $Y_3 = 1{,}2$, bisher gebräuchliche Bruchsicherheitsfaktoren eingesetzt worden. Sie sind, soweit das möglich war, aus SIA-Norm 162 direkt entnommen oder nach typischen Beispielen aus dem System der zulässigen Spannungen umgerechnet worden.

Für die Variation der Sicherheitsmargen nach verschiedenen anderen, zum Teil neuen Parametern («Variablen») sind spezielle Gesichtspunkte vermehrt berücksichtigt worden. Es muss dabei allerdings bei reinen Schätzungen bleiben, solange nicht zuverlässige statische Beobachtungen zugänglich sind. In diesem Sinne sind, um das Prinzip aufzuzeigen, die Zahlenwerte auch für Fälle variiert worden, die in den bisherigen Baunormen nicht besonders qualifiziert waren, und für die auch zum Teil nicht genügend gute Berechnungsgrundlagen verfügbar sind: $Y_1 = 3$; $Y_3 = 3$; $Y_4 = 1{,}2{,}3$. Sie sind als Beispiel zu verstehen; wir können nicht für jeden Zahlenwert spezifische, von den anderen Zahlen unabhängige Begründungen angeben. Dies hat man allerdings auch für die heute gültigen Sicherheitsbestimmungen nicht tun können, die alle auf dem durch lange Erfahrung eingespielten «Gleichgewicht» beruhen. Die angegebenen Zahlenwerte sind auch zu wenig im Detail variiert worden, um die Übersichtlichkeit zu erhalten; sie können deshalb weder formal noch quantitativ Grundlage eines neuen Normenvorschlages sein.

Der Sinn der Untersuchung ist vielmehr, die Struktur und die hauptsächlichsten Fragen des Sicherheitsproblems anhand der verfügbaren Argumente und einiger Beispiele abzuklären. Dies ist eine wichtige Voraussetzung dafür, Sicherheitsbestimmungen auf der Gesamtheit aller Informationen aufzubauen, die wir heute besitzen und mit der Zeit gewinnen werden. Genauer ausgedrückt heisst es, dass Bedingungen geschaffen werden müssen, die es erlauben, schrittweise von den rein «gefühlsmässig» festgesetzten Sicherheitsmargen abzukommen und sie durch wissenschaftlich begründete zu ersetzen. Blosse Schätzungen werden wohl immer in erheblichem Masse beigezogen werden müssen; sie sollen aber nicht die einzige Grundlage sein.

Seit einigen Jahrzehnten ist immer wieder der Versuch gemacht worden, auch quantitative Aspekte des Sicherheitsproblems mit statistischen Daten über einzelne Bauwerkseigenschaften in Zusammenhang zu bringen. [21, 22, 23, 24, 25, 27, 212, 215–217]. Dass dies nie schlüssig gelang, lässt sich durch mehrere Argumente begründen: Einmal durch den Mangel an genügend zuverlässigen statistischen Informationen über alle Parameter. Zum zweiten sind viele Bauwerkseigenschaften oder Funktionen derselben direkt vom menschlichen Handeln abhängig (Hersteller, Benützer). Sie sind somit nichtzufällige Grössen und können nicht Gegenstand statistischer Untersuchungen und Berechnungen sein. Behandelt man sie trotzdem mit solchen Methoden, so führt dies oft zu Fehlschlüssen.

Statistische Informationen müssen also, bei allem Aussagewert, den man ihnen beimessen darf, mit der nötigen Vorsicht gehandhabt werden. Der Verfasser versucht mit der vorliegenden Arbeit darzustellen, wie weit und in welcher Form die heutigen statistischen Informationen zur Bestimmung von Sicherheitsbeiwerten beigezogen werden dürfen.

8. Anhang, spezielle Probleme

8.1. Bemerkungen zum Bauen mit vorfabrizierten Elementen

Die Diskussion des Sicherheitsproblems bis zum Lösungsvorschlag von Abschnitt *5* ist stets im Gedanken an die übliche Baumethode in Ortsbeton durchgeführt worden.

Immer mehr Bauten werden heute aus vorfabrizierten Elementen hergestellt. Über die technischen Vor- und Nachteile dieser neuen Baumethode soll hier nicht gesprochen werden, sondern nur über die speziellen Aspekte des Sicherheitsproblems, die sich daraus ergeben.

Die Probleme des vorfabrizierten Baues lassen sich mit denen des Stahlbaues vergleichen. In beiden Fällen verwendet man schlanke, meist eindimensionale Glieder, und die Hauptschwierigkeit beim Konstruieren und Montieren liegt bei den Verbindungs- und Anschlusstellen. Auch beim Stahlbau geschahen seinerzeit mehrere schwere Unfälle, bis man diesen Problemen genügende Beachtung schenkte [26].

In Abschnitt *4.1.* sind die vier hauptsächlichsten Gruppen von Bauwerkseigenschaften zusammengestellt worden:

Festigkeit
Geometrie
Belastung
Untergrund, Anschlüsse, Verbindungen.

Vergleichen wir die Unsicherheiten, die sich bei diesen vier grundsätzlichen Parametern ergeben, für die beiden Methoden «Ortsbeton» und «Vorfabrikation». Dies führt etwa auf die folgenden Schlüsse und Feststellungen, geordnet nach den Grundparametern:

8.1.1. Festigkeitseigenschaften

Die vorfabrizierten Elemente stammen aus einem industriellen Prozess. Schon weiter oben wurde festgestellt, dass dabei bessere und vor allem gleichmässigere Festigkeitseigenschaften erzielt werden können, als es beim Ortsbeton möglich ist, der allgemein unter weniger guten Bedingungen hergestellt wird. Das hat seine Auswirkunin der Streubreite der Betonfestigkeit, und zwar sowohl bei den häufigen, unvermeidlichen zufälligen Abweichungen wie auch bei den groben Fehlern, die durch eine Fabrikkontrolle viel besser ausgeschaltet werden können, als es auf der Baustelle angeht. Für sorgfältig hergestellte Elemente aus Werkstattprozessen darf man also annehmen, dass ihre Tragfähigkeit gleichmässiger ist als bei gleichartigen Traggliedern aus Ortsbeton. Als Richtwert mag etwa $v_T = \pm 10\%$ für den Variationskoeffizienten dieser Grösse gelten, ein Fehlermass, das wohl nicht mehr stark reduziert werden kann, das aber im allgemeinen neben anderen Fehlerquellen nicht mehr ins Gewicht fallen wird. Beim Ortsbeton hingegen gibt es Streuungen der Festigkeit von 20% und mehr.

Leider muss auf das Wort «sorgfältig» hier eine starke Betonung gelegt werden, denn es hat in der letzten Zeit einige Fälle gegeben, wo Betonelemente wegen unsachgemässer und unsorgfältiger Herstellung eine stark verminderte Tragfähigkeit hatten und auf der Baustelle versagten. Dies mag in den meisten Fällen weniger in der Festigkeit des Betons selbst liegen, sondern eher in der ungünstigen konstruktiven Ausbildung der Elemente, was sich aber in gleicher Weise auswirkt wie ein Mangel an Festigkeit.

Eine weitere Gefahr liegt für die vorfabrizierten Elemente im Transport auf die Baustelle. Oft werden Tragelemente durch die ganz anderen Beanspruchungsverhältnisse auf dem Weg beschädigt, aber dann doch montiert. Dies hat in vielen Fällen keine nachteiligen Folgen für die Tragfähigkeit der Konstruktion. Es ist aber eine zusätzliche Quelle von Fehlern.

8.1.2. Geometrie, Abmessungen

Zu den Ungenauigkeiten bei den Massen der vorfabrizierten Elemente lässt sich Ähnliches bemerken wie für die Festigkeitseigenschaften. Die Abweichungen sind im allgemeinen bedeutend kleiner. Sie liegen meist in der Grössenordnung von Millimetern. Auch für die Lage der Armierung kann man mit einer gehörigen Verbesserung rechnen. Da es sich häufig um vorgespannte Elemente handelt, lässt sich dies leicht einsehen: Die Spanndrähte werden in der Schalung durch eine Lehre festgehalten und gespannt, so dass sie durch das Einfüllen des Betons kaum mehr aus ihrer Lage gebracht werden können.

Mit der nötigen Vorsicht darf man also feststellen, dass die Tragfähigkeit der vorfabrizierten Elemente als Funktion von Materialfestigkeit und Abmessungen eine geringere Streuung hat als beim Ortsbeton. Welche Konsequenz dies für das Sicherheitsproblem hat, soll erst weiter unten zur Sprache kommen.

8.1.3. Belastung

Bauten aus vorfabrizierten Elementen werden zum gleichen Zweck und an der gleichen Stelle eingesetzt wie solche aus Ortsbeton. Es besteht deshalb kein Grund, an den Argumenten der Belastungsannahme etwas zu ändern.

Das hat aber zur Folge, dass der Vorteil, der mit der geringeren Streuung der Tragfähigkeit gewonnen wurde, schlussendlich viel kleiner ist, als zu erwarten gewesen wäre. Eine kleine Rechnung möge dies illustrieren.

Die Streuung von Tragfähigkeit und Belastung betrage für ein Bauwerk aus Ortsbeton je 15 %. Dann ist die Streuung des Sicherheitsfaktors, wenn alle übrigen Fehlereinflüsse vernachlässigt werden können:

$$v_S = \left(2 \cdot 15^2\right)^{\frac{1}{2}} \cdot 100 = 21\%$$

Für ein vorfabriziertes Element soll die Streuung der Tragfähigkeit auf die Hälfte reduziert sein. Der Variationskoeffizient des Sicherheitsfaktors beträgt dann

$$v_S = \left(8^2 + 15^2\right)^{\frac{1}{2}} \cdot 100 = 17\%$$

Der Grund dafür, dass die Fehlerreduktion so klein wird, ist die Gestalt des «Fehlerfortpflanzungs-Gesetzes».

Für grobe Fehler lassen sich ähnliche Überlegungen anstellen. Die Reduktion wird dort etwas besser, nämlich um alle jene Fehlerquellen, die durch die besseren industriellen Kontrollmassnahmen ausgeschaltet werden können.

8.1.4. Anschlüsse, Verbindungen

Vorfabrizierte Elemente werden meist an Ort und Stelle untereinander und mit der übrigen Tragkonstruktion verbunden. Es hat sich gezeigt, dass darin die schwache Stelle der ganzen Baumethode zu suchen ist. Die Anschlüsse werden aus einem anderen Material – meist aus Ortsbeton – hergestellt als die Tragelemente selbst.

Aus wirtschaftlichen Gründen werden vorfabrizierte Elemente meist mit sehr hohen Betonfestigkeiten hergestellt. Sind aber die Verbindungsstücke aus Ortsbeton, der wegen der Bedingungen auf der Baustelle unmöglich mit einer solchen hohen Festigkeit aufbereitet werden kann, so gibt es damit im Tragwerk immer Stellen, die «weniger stark» und auch weniger gleichmässig Widerstand leisten als die Elemente selbst. Häufig liegen die Verbindungsstellen aus Montagegründen an Stellen mit hoher Beanspruchung (Knotenpunkte, Eckpunkte usw.), so dass in vielen Fällen die hohe Festigkeit der Tragelemente sich nicht voll auswirken kann.

Eine andere Konsequenz daraus ist, dass man den Anschlusstellen besondere Beachtung zu schenken hat, damit sie nämlich die Kräfte, die ihnen zugemutet werden, auch wirklich übertragen können. Speziell gilt dies für weiträumige und vielgliedrige Hochbaukonstruktionen. Häufige Unfälle bei der Montage haben gezeigt, dass Bauzustände des teilweise montierten Tragwerks auftreten können, in denen es zu wenige Bindungen hat, die schon in Funktion sind (Stellen, die im Gebrauchszustand geschlossen sind und alle sechs verallgemeinerten Kräfte übertragen können, sind noch nicht fertig verbunden und leisten keinen Widerstand gegen Verschiebungen in dieser oder jener Richtung). Das Tragwerk kann dann zu einem kinematischen System werden, das gegen gewisse Bewegungen keinen oder einen sehr geringen Widerstand leistet und somit durch kleine «passende» Kräfte in Bewegung versetzt werden kann. Sicherungen dagegen sind Aufgabe der Planung des Montagevorganges und gehören zu den Pflichten des Konstrukteurs, der sich für jeden Bauzustand zu vergewissern hat, ob das Tragwerk nicht (auch nicht nahezu) unstabil sein kann.

Für den Gebrauchszustand gilt Ähnliches. Meist fällt hier eine Kraftübertragung nicht gänzlich weg, wie es während der Montage vorkommen kann, sondern ist nur früher erschöpft, als man berechnete. Unter extremen Kräften (vor allem Wind) kann dann die Erschöpfung von Verbindungsstellen schon auftreten, bevor die Tragelemente auch nur annähernd bis zu ihrer Tragfähigkeit beansprucht sind.

Aus dem eben Gesagten geht hervor, dass sich beim Bauen mit vorfabrizierten Elementen neuartige Probleme stellen. Die Informationsquelle der langen Erfahrung fällt somit für diesen Sektor vorläufig aus. Nach den Überlegungen über die Grundlagen der Sicherheitsmargen ist es demnach noch zu früh, solche auch für das Bauen mit vorfabrizierten Elementen zu formulieren. Bis dies geschehen kann, müssen wohl, so weit es möglich ist, die bisherigen Bestimmungen angewandt werden. Ergänzungen und Änderungen müssen sich nach und nach aus Untersuchungen und Erfahrungen ergeben.

8.2. Zusammengesetzte Beanspruchungen mit verschiedenen Vorzeichen

Zur Illustration des Problems sei ein einfaches Beispiel an den Anfang gesetzt:

Es sei ein einfacher Balken aus Stahlbeton zu bemessen. Gegeben sind drei verschiedene Belastungen (Nominalwert und Streuung):

ständige Last	$\bar{g} = 800$ kg/m	$v_g = \pm 0$
Schnee	$\bar{p} = 1400$ kg/m	$v_p = \pm 10\%$
Wind (Auftrieb)	$\bar{w} = -700$ kg/m	$v_w = \pm 10\%$

Die Daten des Balkens sind:

Spannweite	$l = 6$ m
Querschnitt	$d = 50$ cm
	$b = 25$ cm

Der Balken sei gegen negative Auflagerkräfte genügend gesichert, der Lagerkonstruktion muss deshalb keine Aufmerksamkeit mehr geschenkt werden.

Wir berechnen (mit Nominalwerten) das maximale positive und negative (oder minimale positive) Moment in Trägermitte:

$$M^{+}_{max} = \frac{(g+p) \cdot 1^2}{8} = +\,1000 \text{ cmt}$$

$$M^{+}_{min} = \frac{(g+w) \cdot 1^2}{8} = +\,50 \text{ cmt}$$

Als Resultat der Bemessung wird die untere Armierung in Feldmitte bestimmt. Sie wird aus dem maximalen positiven Feldmoment berechnet und beträgt:

$Fe = 11{,}6 \text{ cm}^2$
mit $\sigma_b = 110 \text{ kg/cm}^2$ und $\sigma_e = 2000 \text{ kg/cm}^2$

Eine obere Armierung ist nach SIA-Norm 162 nicht notwendig, da aus den verzeichneten Belastungen keine negativen Momente entstehen.

Für das weitere betrachten wir zur Vereinfachung die Werte von Festigkeit und Geometrie als genau, d. h. die Tragfähigkeit besitzte keine Streuung. Das einzige Element, bei dem Abweichungen zu erwarten sind, ist demnach die Belastungsannahme. Für alle drei Belastungsarten soll die Normalverteilung gelten. Dies ist zwar eine grobe Näherung; sie wird am Resultat der Betrachtung aber grundsätzlich nichts ändern.

Wir berechnen die Variationskoeffizienten der Beanspruchungen:

$$v(M_{max}) = \pm\, v_p \cdot \frac{p}{g+p} = \pm\, 6{,}4\%$$

$$v(M_{min}) = \pm\, v_w \cdot \frac{w}{g+w} = \pm\, 70\%$$

Die mittleren Fehler der gleichen Grössen betragen:

$\sigma\,(M_{max}) = M_{max} \cdot v(M_{max}) = \pm\, 64 \text{ cmt}$
$\sigma\,(M_{min}) = M_{min} \cdot v(M_{min}) = \pm\, 35 \text{ cmt}$

Die Tragfähigkeit für positive Momente beträgt:

$$M_p = \sigma_F \cdot Fe \cdot h \cdot \left(1\text{–}0{,}6 \cdot \frac{\sigma_F \cdot Fe)}{bh \cdot \beta}\right) = 1840 \text{ cmt}$$

Der Sicherheitsfaktor gegen positive Momente ist somit:

für M_{max}: $\bar{S} = 1{,}84$
für M_{min}: $\bar{S} = 37$

Von hier an beschränken wir uns auf die Betrachtung des minimalen Momentes, da die Sicherungsungleichung für positive Momente genügend gut erfüllt ist.

Zeichnen wir die Wahrscheinlichkeitsfunktion des minimalen Momentes auf, so erkennen wir *(Abb. 17)*, dass offenbar mit einer merkbaren Wahrscheinlichkeit auch negative Werte entstehen können. Die Wahrscheinlichkeit dafür entspricht dem schraffierten Bereich und beträgt:

$$W(M_{min} \leq 0) = F(0) = 7{,}6\%$$

Für negative Momente ist aber der Wert unserer berechneten Tragfähigkeit (M_p) falsch. Er hängt bei Stahlbetonkonstruktionen offenbar vom Vorzeichen der Beanspruchung ab und ist – wenn man die Zugfestigkeit des Betons vernachlässigt – ungefähr

$$M^{-}_{p} = 0$$

Für ein negatives Moment verschwindet somit auch der Sicherheitsfaktor:

$$S^{-} = \frac{M^{-}_{p}}{M^{-}} = \frac{0}{M} = 0$$

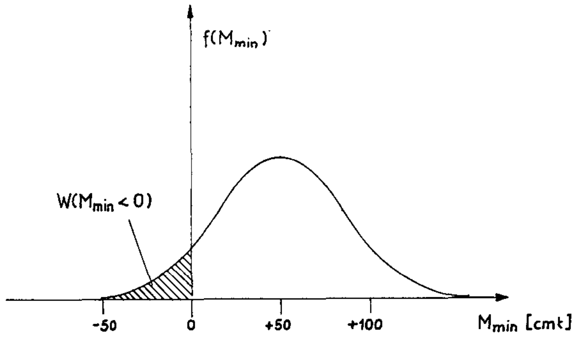


Abb. 17

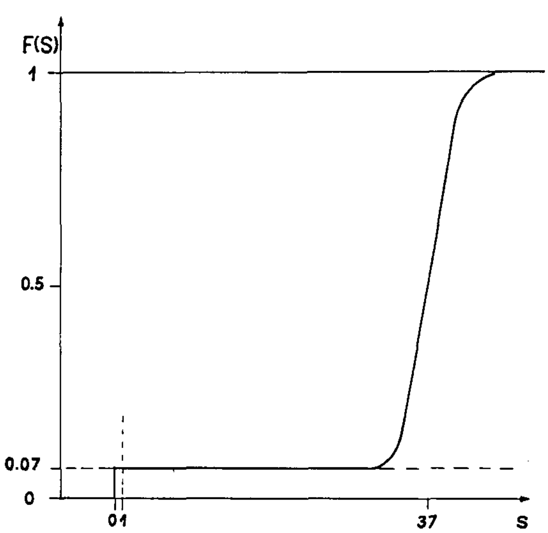


Abb. 18

Der schraffierte Bereich stellt also zugleich die Wahrscheinlichkeit dafür dar, dass der Sicherheitsfaktor kleiner ist als der kritische Wert eins. Er entspricht ungefähr der Bruchwahrscheinlichkeit. Wir können die Wahrscheinlichkeitsfunktion des Sicherheitsfaktors auftragen *(Abb. 18)* und greifen bei $S = 1$ die Bruchwahrscheinlichkeit zu ungefähr 7,6%ab; die Sicherheit ist somit nur 92,4%, was offensichtlich völlig ungenügend ist.

Daraus lässt sich der Schluss ziehen, dass beim Anwenden der üblichen Methode der Grenzwerte aus Nominalwerten der Belastung Vorsicht geboten ist [35].

Besser lässt sich das etwa wie folgt formulieren:

Ist eine Beanspruchung die Summe aus mehreren, von verschiedenen Belastungen herrührenden Anteilen mit verschiedenem Vorzeichen, so ergeben sich Unstetigkeiten in der Verteilungsfunktion des Sicherheitsfaktors, wenn die Beanspruchung auf einen Querschnitt wirkt, dessen Widerstand vom Vorzeichen der Beanspruchung abhängt. Beachtet man das nicht, so überschätzt man die Sicherheit.

Das Beispiel ist sehr einfach gewählt, so dass wohl in der Konstruktionspraxis ohne weiteres erkannt würde, dass der Balken auch gegen negative Momente zu armieren ist. Es gibt aber andere Fälle, wo das Kräftespiel nicht so übersichtlich und der wahre Charakter des Problems wesentlich schwieriger zu erkennen ist. Es stellt sich die Frage, wie denn ein System von Sicherheitsbeiwerten aussehen müsste, damit einer solchen Gefahr automatisch begegnet werden könnte.

Eine Möglichkeit der Lösung bietet sich in der Verwendung von modifizierten Lastfaktoren:

Es werden jedem Belastungsanteil Koeffizienten beigefügt, die dem Vorzeichen nach den erwarteten Abweichungen nach oben und nach unten entsprechen und die Sicherheitsmarge des betreffenden Bemessungsfalles enthalten. Jede Belastung muss also mit zwei verschiedenen Faktoren erweitert und für jeden von beiden untersucht werden. Dann sind die ungünstigsten Kombinationen dieser veränderten Belastungsanteile die Bemessungsgrundlage, und es entsteht daraus eine Art erweitertes Grenzwertverfahren, das für das angefangene Beispiel durchgeführt werden soll.

Wir bilden Lastfaktoren für die Maximalwerte der Belastungsanteile:

$$\lambda^+_g = 1{,}2 \quad \lambda^+_p = 2{,}1 \quad \lambda^+_w = 1{,}8$$

und für die Minimalwerte;

$$\lambda^-_g = 0{,}8 \quad \lambda^-_p = 0 \quad \lambda^-_w = -0{,}5$$

Diese werden an den Nominalwerten der Belastungen angebracht, und wir erhalten die «grösste» und die «kleinste» Beanspruchung für jede Belastung gesondert:

	M_{max}	M_{min}
g:	$\lambda^+_g \cdot \frac{g \cdot l^2}{8} = +\ 4{,}3$ mt	$\lambda^-_g \cdot \frac{l^2 \cdot g}{8} = +\ 2{,}6$ mt
p:	$\lambda^+_p \cdot \frac{p \cdot l^2}{8} = +\ 13{,}2$ mt	$\lambda^-_p \cdot \frac{l^2 \cdot p}{8} = 0$
w:	$\lambda^-_w \cdot \frac{w \cdot l^2}{8} = +\ 1{,}6$ mt	$\lambda^+_w \cdot \frac{w \cdot l^2}{8} = -\ 5{,}7$ mt

Es muss hier betont werden, dass «Minimalwert» und «Maximalwert» nicht in einem statistischen Sinne zu verstehen sind. In den Zahlen für die Lastfaktoren ist die gesamte Sicherheitsmarge eingeschlossen, sie haben also grundsätzlich nichts mit einer statistischen Variation der Belastungsannahme zu tun. Die Aufteilung in Lastfaktoren geschieht hier einzig und allein, um den oben beschriebenen Fehler zu verhindern. Weil, wie in *4.5.1.* für die Materialfaktoren gezeigt wurde, eine algebraische Beziehung zwischen Verteilungsfunktionen und Sicherheitsmargen nicht mehr hergestellt werden kann, sobald diese in Teilfaktoren aufgespalten werden, sind diese Lastfaktoren reine Vergleichswerte. Als solche sind sie mit den statistischen Gesetzen der Sicherheit nicht in Übereinstimmung zu bringen, können aber wohl als Näherung für den einfachen Sicherheitsfaktor eingesetzt werden.

Im weiteren berechnen wir die Extremwerte der Beanspruchung aus der Variation der Belastungsfälle. Damit nicht alle Variationen einzeln berechnet werden müssen, sondern sich die Extremwerte direkt bestimmen lassen, ist folgende kleine Regel über die Vorzeichen der zu wählenden Lastfaktoren zu beachten:

Es soll stets erfüllt sein:

$$\mathrm{sign}(\lambda_i - 1) \cdot \mathrm{sign}(q_i) = \mathrm{sign}(B_{max} - \bar{B})$$

Darin bedeutet q_i einen spezifischen Lastanteil, λ_i den dazu gehörenden Lastfaktor, B_{max} und $\bar{B}$ den gesuchten Extremwert bzw. den Nominalwert der Beanspruchung. Durch diese einfache Vorzeichenregel wird der Fall $\lambda_i = 1$ nicht erfasst. Er bedeutet, dass das Extrem gerade gleich dem Nominalwert ist und als solcher in die Bestimmung der Beanspruchung eingesetzt werden kann. Ferner ist vorausgesetzt:

$$\lambda^-_i \leq 1 \leq \lambda^+_i$$

Das bedeutet, dass der Nominalwert einer jeden Belastung zwischen den beiden «Extremen» liegen muss, was in der Regel der Fall sein wird.

Zum Vorgehen mit den doppelten Lastfaktoren bedarf es noch einiger Bemerkungen [214].

1. Der Nachteil formaler Art, der in *4.5.* für die Lastfaktoren festgestellt wurde, wirkt sich dahin aus, dass die eben berechneten «Extremwerte» nicht echte Extremwerte, sondern Vergleichsgrössen für die Bemessung sind. Dies widerspricht dem Grundsatz, dass die wahre Gestalt des statischen Problems durch die Sicherheitsmargen nicht verändert werden dürfe. Das ist ein ernster Einwand. Er kann folgendermassen illustriert werden: Wegen der Sicherheitsmargen, die in die Lastfaktoren eingefügt werden müssen, ergeben sich für die «Extremwerte der Bemessung», die man daraus rechnet, Grössen, die mit der Wirklichkeit nichts mehr zu tun haben.

2. Der Vorteil, der mit dem Verfahren der doppelten Lastfaktoren gewonnen würde, ist, dass das oft unübersichtliche und schwer erkennbare Problem der zusammengesetzten Beanspruchung zuverlässig berücksichtigt werden kann, ohne dass der Rechenaufwand wesentlich vergrössert würde.

3. Das Verfahren setzt die Superposition der Kräfte bei der Beanspruchung voraus. Da diese nur bei rein elastischen Problemen erster Ordnung und im weiteren Sinne bei allen statisch bestimmten Aufgaben richtig ist, kann das Verfahren zum Beispiel auf plastische Berechnungsmethoden in dieser Form nicht angewandt werden.

4. Ein System von doppelten Lastfaktoren müsste auf die Belastungsannahme allein ausgerichtet werden können. Dass auch noch Abweichungen der anderen Bauwerkseigenschaften darin berücksichtigt werden müssen, lässt sich durch eine Kombination mit Materialfaktoren vermeiden, wie sie, ohne allerdings doppelte Lastfaktoren vorzuschreiben, schon manchenorts im Gebrauch ist (*4.5.2.*).

Literaturnachweis

(Nach Sachgebieten geordnet)

1. Statistik, Mathematik

[11] *B.L. Van der Waerden,* Mathematische Statistik, Springer-Verlag, Berlin, 1957.

[12] *Emil J. Gumbel,* Statistical Theory of Extreme Values and Some Practical Applications. National Bureau of Standards, Applied Mathematics Series No. 33, Washington D.C., 1954.

[13] *W.A. Weibull,* Statistical Theory of the Strength of Materials, Ingeniørsvetenskapsakademiens Handlingar, No. 151, Stockholm, 1939.

2. Sicherheit

[21] *A.M. Freudenthal,* Safety and Probability of Structural Failure. Proc. of the ASCE, vol. 80, sep. No. 468, 1954.

[22] *A.M. Freudenthal,* Safety, Reliability and Structural Design, Proc. ASCE, Struct Div., März 1961.

[23] *E. Basler,* Untersuchungen über den Sicherheitsbegriff von Bauwerken, Schweizer Archiv für angewandte Wissenschaften, 27. Jahrgang, 1961.

[24] *W.R. Schriever,* Loads and Load Factors, Technical Paper No. 106, of the Division of Building Research, Ottawa, Okt. 1960.

[25] *C.B. Brown,* Concepts of Structural Safety, Proc. ASCE, Struct. Div., Dez. 1960.

[26] *C. Stamm,* Brückeneinstürze und ihre Lehren, Mitteilungen aus dem Institut für Baustatik, ETH. Zürich.

[27] *A. G. Pugsley,* Concepts of Safety in Structural Engineering, Journal of the Inst. of Civ. Eng., März 1951.

[28] *A.H. Chilver,* Some Problems of Structural Safety, British Welding Journal, 1955.

[29] *William I. Stieglitz,* Safety and Reliability as Design Parameters, Aeronautical Engineering Review, Sept. 1955.

[210] *A.G. Pugsley,* Design for Safety and Efficiency, The Structural Engineer, Jan. 1957.

[211] *A.G. Pugsley,* Current Trends in the Specifications of Structural Safety, Engineer, Juni 1961.

[212] *Paul Weidlinger,* A new Approach to Safety of Buildings, Architectural Record, Okt. 1952.

[213] *M. Délesques,* Ce qui représente le coefficient de la sécurité, Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics.

[214] *R. Wolfensberger,* Bemerkungen über die Sicherheit, Kolloquium zum Kurs über plastische Berechnungsmethoden, ETH Zürich, Institut für Baustatik, 1963.

[215] *E. Torroja,* Philosophy of Structures, University of California Press, Berkeley 1960.

[216] *E. Torroja, A. Paez,* Calcul du Coefficient de sécurité, IABSE, 4. Kongress, Vorbericht, 1952.

[217] *E. Torroja,* Load Factors, Report ICBR, Journal of the ACI, 1958.

[218] *A.L.L. Baker,* The Work of the European Committee on Concrete, Structural Engineer, volume 36, No. 1, Jan. 1958.

[219] *S.O. Asplund,* The Risk of Failure, Structural Engineer, vol. 36, No. 8, Aug. 1958.

[220] *Hajnal-Konyi,* Reinforced Steel in Concrete and the Concept of Safety, Proc. ACI, vol. 48, 1952.

[221] *F.G. Thomas,* Load Factor Methods of Designing Reinforced Concrete, Reinforced Concrete Review, vol. 13, No. 8, 1955.

[222] *S.C.C. Bate,* Discussion on Prestressed Units for Shortspan Highway Bridges, Proc. Inst. Civ. Engineers, Juni 1955.

[223] *A.M. Freudenthal,* Load Factors, Jour. ACI, März 1960.

[224] *Rosenblueth,* Discussion to (217).

[225] *M. Tichy, M. Vorliček,* Safety of Eccentrically Loaded Reinforced Concrete Columns, Jour. ASCE, Struct. Div., Okt. 1962.

[226] *N.C. Lind, C.J. Turkstra, D.T. Wright,* Sicherheit, Wirtschaftlichkeit und Aufwand in der Tragwerksberechnung, IVBH-Vorbericht zum VII. Kongress, 1964.

3. Baustatik

[31] *B. Thürlimann, H. Ziegler,* Plastische Berechnungsmethoden, Fortbildungskurs für Bau- und Maschineningenieure, ETH Zürich, 1963.

[32] *B.G. Neal,* Die Verfahren der plastischen Berechnung biegesteifer Stahlstabwerke, Springer-Verlag, Berlin, 1958.

[33] *L.B. Kriz,* Ultimate Strength Criteria for Reinforced Concrete, Proc. ASCE, Eng. Mech. Div., Juli 1959.

[34] *F. Knoll,* Tabellen für die Traglast doppelt armierter Stahlbetonquerschnitte bei Druck mit kleiner Exzentrizität, Schweiz. Bauzeitung, Dez. 1965.

[35] *K. Beyer,* Die Statik im Eisenbetonbau, Band 2, Springer-Verlag, Berlin, 1934.

4. Daten zur Statistik der Materialeigenschaften

[41] *G. Winter,* Properties of Steel and Concrete and the Behaviour of Structures, Proc. ASCE, Struct. Div., Febr. 1960.

[42] *O.G. Julian,* Synopsis of the first Report of Committee on Factors of Safety, Proc. ASCE, Struct. Div., Juli 1957.

[43] *H. Blaut,* Über den Zusammenhang von Qualität und Sicherheit im Betonbau, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 149, Berlin, 1962.

[44] Stahlton AG, Die statistische Festigkeitsprüfung des Standardbetons *B* im Werk III, Zürich, Nov. 1963.

[45] AG der von Moss'schen Eisenwerke, «Spannstähle», Berichte, Luzern, Jan. 1964.

5. Normen

[51] SIA-Norm 160, Normen für die Belastungsannahme, die Inbetriebnahme und die Überwachung der Bauten, Zürich, 1956.

[52] SIA-Norm 161, Normen für die Berechnung und Ausführung der Stahlbauten, Zürich, 1956.

[53] SIA-Norm 162, Normen für die Berechnung und Ausführung der Beton- und Eisenbetonbauten, Zürich, 1956.

[54] Building Code Requirements for Reinforced Concrete, ACI Standard 318-63, Detroit 19, Juni 1963.

[55] UdSSR-Norm für Eisenbeton, N und TU 123-55, Moskau, 1955.

[56] Dansk Ingeniørforenings Normer for Bygningskonstruktioner, Beton- og Jernbetonkonstruktioner, Dansk Standard DS 411, Kopenhagen, 1949.

Lebenslauf des Verfassers

Als Bürger der Stadt Frauenfeld wurde ich am 24. Mai 1937 in St. Gallen geboren. Dort besuchte ich in den Jahren 1944 bis 1950 die Primarschule. Im Frühjahr 1950 trat ich ins Gymnasium der sanktgallischen Kantonsschule ein, das ich im Jahre 1956 mit der Maturität, Typus B, verliess. Im gleichen Jahre begann ich das Studium an der Abteilung für Bauingenieurwesen an der Eidgenössischen Technischen Hochschule, wo ich 1960 mit dem Diplom als Bauingenieur abschloss. Anschliessend war ich zwei Jahre als Assistent am Geodätischen Institut der ETH tätig, wo ich Gelegenheit hatte, mich in die Gebiete der Fehlertheorie und Ausgleichungsrechnung einzuarbeiten. Gleichzeitig begann ich im Frühjahr 1961 mit dem Studium der Literatur zur vorliegenden Untersuchung. Von Anfang 1963 bis heute bin ich am Institut für Baustatik angestellt, wo ich unter der Leitung von Herrn Prof. Dr. B. Thürlimann hauptsächlich mit dieser Arbeit beschäftigt war.